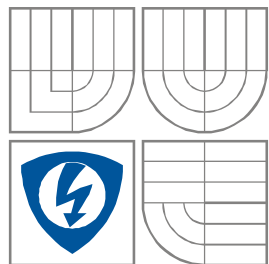


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Řízení krokových motorů se zpětnou vazbou

Control of Stepper Motors in Closed Loop System

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Jan Hořák

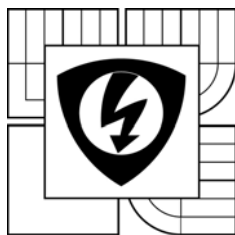
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Jan Hořák

Ročník: 2

ID: 134316

Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

Řízení krokových motorů se zpětnou vazbou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznámte s obvodem NCV70514 firmy ON Semiconductor - inteligentním budičem krokových motorů v automobilovém průmyslu. Zaměřte se zejména na řízení tohoto obvodu pomocí mikrokontroléru. Navrhněte základní obvodové zapojení celého budiče s obvodem NCV70514 a mikrokontrolérem. Nastudujte algoritmy pro řízení krokových motorů se zpětnou vazbou použitelné s obvodem NCV70514 a vybraným mikrokontrolérem.

Realizujte ukázkové zařízení pro řízení krokových motorů za použití obvodu NCV70514 a mikrokontroléru s možností nastavení a řízení přes rozhraní počítače. Cílem je navrhnout a optimalizovat algoritmy pro řízení krokového motoru se zpětnou vazbou pomocí měření BEMF. Zaměřte se na samočinné řízení proudu krokovým motorem v závislosti na zátěži. Navržené algoritmy ověřte měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FRÝZA T., FEDRA Z., ŠEBESTA J. Mikroprocesorová technika, Laboratorní cvičení. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 51s. ISBN: 978-80-214-3756-2.

[2] Atmel Corporation. USA. Atmega16 Datasheet. 2008. 358s. cit. dne 2.6.2014, Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf>.

Termín zadání: 9. 2. 2015

Termín odevzdání: 21.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem diplomové práce je návrh a optimalizace algoritmu pro řízení krokových motorů se zpětnou vazbou pomocí měření BEMF. Byl kladen důraz na samočinné řízení proudu krokovým motorem v závislosti na zátěži. Pro ověření algoritmu bylo navrženo a sestaveno ukázkové zařízení s pomocí integrovaného obvodu NCV70514 od firmy ON Semiconductor. Výsledkem práce je ukázkové zařízení, ovládací program a algoritmus pro řízení krokového motoru.

Klíčová slova

Budič krokových motorů, NCV70514, krokový motor, SPI, ARM, NXP, LPC4078, Qt.

Abstract

The theme of this thesis is the design and optimization of algorithms for controlling stepper motors with feedback by measuring the BEMF. The emphasis was on self-management stepper motor current depending on the load. To verify the algorithm was designed and built sample devices with integrated circuit NCV70514 from ON Semiconductor. The result is a sample device, the control program and algorithm to control a stepper motor.

Keywords

The driver of stepper motors, NCV70514, stepper motor, SPI, ARM, NXP, LPC4078, Qt.

HOŘÁK, J. *Řízení krokových motorů se zpětnou vazbou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 59 s., 19 s. příloh. Diplomová práva. Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj diplomovou práci na téma Řízení krokových motorů se zpětnou vazbu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Hartlovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Mé poděkování též patří rodičům za ochotu a snahu pomoci při zpracování této práce.

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

Seznam obrázků:	10
Seznam tabulek:	11
1. Úvod	12
2. Teoretický úvod	13
2.1 NCV70514	13
2.1.1 SPI sběrnice	14
2.1.4 Detektor pohybu motoru	17
2.1.5 Ochranné a doplňkové funkce	18
2.1.6 Výstupní H-můstek s PWM regulací	18
2.2 Krokový motor	20
2.2.1 Hybridní krokový motor	20
2.2.2 Princip otáčení krokového motoru	21
2.2.3 Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází	21
2.2.4 Osmitaktní řízení	22
2.2.5 Mikrokrokování	23
3 Prototyp	24
3.1 Návrh HW	24
3.1.1 Zapojení NCV70514	24
3.1.2 Volba Mikrokontroléru	25
3.1.3 Komunikace s PC	25
3.1.4 Krokový motor	26
3.1.5 Návrhové prostředí	27
3.2 Návrh SW	27
3.2.1 Vývojové prostředí	27
3.2.2 Grafické prostředí	27
4 Ovládací program	28
4.1 Popis ovládacího programu a použití Qt	28
4.3 Datový protokol pro komunikaci mezi počítačem a mikrokontrolérem ...	29
5. Měření	30

5.1 Teorie o BEMF a vliv prostředí na jeho hodnotu	30
5.2 měření BEMF na rychlosti otáčení	31
5.3 měření BEMF na velikosti zatížení motoru	33
6 Algoritmus pro řízení proudu	35
7 Závěr.....	39
Literatura.....	40
Seznam symbolů, veličin a zkratk	42
Seznam příloh.....	43

Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Vnitřní blokové schéma NCV70514 [1].....	13
Obrázek 2 - Způsoby zapojení SPI sběrnice	14
Obrázek 3 - Ukázka způsobu komunikace s obvodem NCV70514 [1]	15
Obrázek 4 - Schéma zapojení při měření napětí BEMF[3]	17
Obrázek 5 - Hybridní krokový motor [2]	21
Obrázek 6 - čtyřtaktní způsob řízení pomocí dvou fází [5]	22
Obrázek 7 - Statická momentová charakteristika pomocí dvou cívek [2]	22
Obrázek 8 - Osmitaktní řízení pomocí dvou cívek [5]	23
Obrázek 9 - Mikrokrokování pomocí dvou cívek [5]	23
Obrázek 10 - Vzorové zapojení NCV70514 [1]	24
Obrázek 11 - Vnitřní zapojení krokového motoru [12]	26
Obrázek 12 - Hlavní okno ovládacího programu.....	28
Obrázek 13 - Komunikační protokol mezi ovládacím programem a mikrokontrolérem.....	29
Obrázek 14 - Průběh závislost BEMF na frekvenci krokování[3]	30
Obrázek 15 - Změřená hodnota BEMF na frekvenci krokování	31
Obrázek 16 - Porovnání hodnot BEMF z obou cívek.....	32
Obrázek 17 – Průběh hodnot BEMF při rampovém průběhu	32
Obrázek 18 - Měřicí soustava.....	33
Obrázek 19 - Průběh BEMF pro při změně zátěže a proudu.....	34
Obrázek 20 - Vliv velikosti zátěže na průběh BEMF při konstantním proudu cívkou	35
Obrázek 21 - Blokové schéma algoritmu	36
Obrázek 22 - Průběh hodnot BEMF při použití algoritmu pro řízení proudu na zatížené hřídeli	37
Obrázek 23 - Průběh proudu při použití algoritmu pro řízení proudu na zatížené hřídeli	37
Obrázek 24 - Průběh hodnot BEMF při použití algoritmu na nezatížené hřídeli	38
Obrázek 25 - Průběh proudu při použití algoritmu na nezatížené hřídeli	38

Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Prahové hodnoty napětí pro obvody signalizující nízká napětí [1] ..	16
Tabulka 2 - Seznam hodnot odpovídající proudu při stavu lhold a lrun[1]	19
Tabulka 3 - Tabulka hodnot ke krokovému motoru KH42HM2-951 [12]	26
Tabulka 4 - Adresace zařízení.....	29
Tabulka 5 - Seznam použitých zátěží	33

1.Úvod

Tématem této diplomové práce je návrh algoritmů pro řízení krokových motorů pomocí obvodu NCV70514 od firmy ON Semiconductor. Hlavní důraz je kladen na způsob měření BEMF, analýzu naměřených průběhů a jejich použití pro řízení proudu v krokových motorech

V teoretickém úvodu bude čtenář podrobněji seznámen s parametry a jednotlivými funkcemi obvodu NCV70514. Za ním bude následovat popis použitého mikrokontroléru LPC4078FBD144 od firmy NXP a krokový motor KH42HM2-951 od firmy SERVO.

V následující části bude čtenář seznámen s návrhem obvodového zapojení a seznámen s grafickým prostředím pro ovládání motoru. Návrh obvodového zapojení počítá s použitím tří obvodů NCV70514, mikrokontrolérem LPC4078FBD144 a použitím převodníku USB-RS232 pro komunikaci s počítačem.

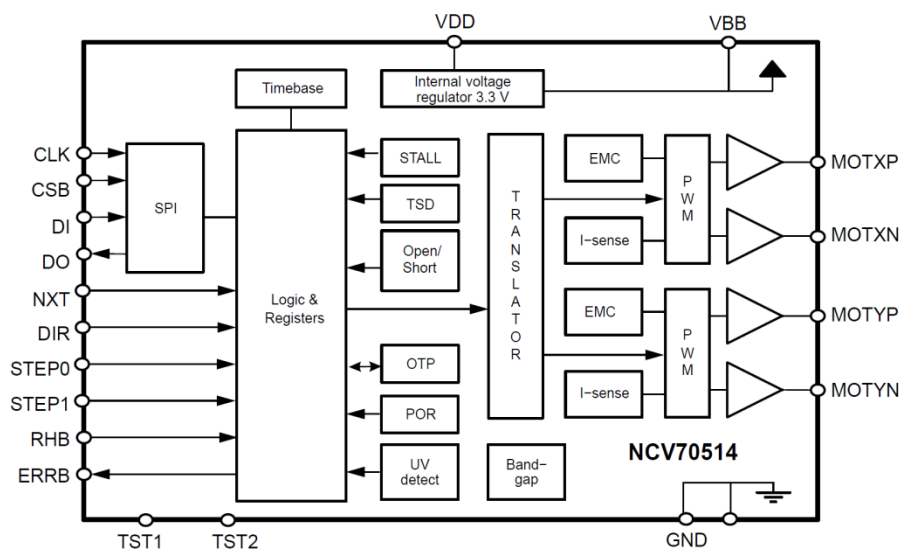
V poslední části se práce zabývá návrhem algoritmů pro řízení krokových motorů se zpětnou vazbou. Důraz bude kladen na získávání hodnot BEMF a jejich analýzou. Získané zkušenosti, pak budou použity pro návrh algoritmů pro samočinné řízení krokových motorů v závislosti na zátěži.

2. Teoretický úvod

V této kapitole se budeme věnovat jednotlivým funkcím integrovaného obvodu NCV70514. Podrobněji si projdeme komunikaci, možnosti nastavení a způsoby řízení krokových motorů.

2.1 NCV70514

Hlavním bodem této práce je obvod NCV70514 od firmy ON Semiconductor. Jedná se o inteligentní budič krokových motorů s velkou možností nastavování parametrů. Vnitřní blokové schéma tohoto integrovaného obvodu vidíme na Obrázek 1.



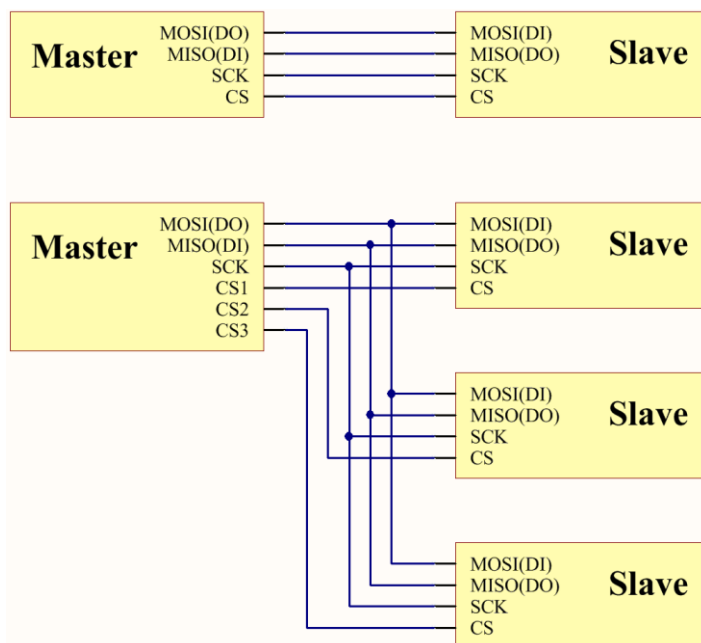
Obrázek 1 - Vnitřní blokové schéma NCV70514 [1]

Uvnitř integrovaného obvodu se nachází výkonová část, tak i řídicí část. Výkonová část se skládá ze dvou H-můstků, snímače proudu a generátoru signálu PWM. Díky umístění všech těchto obvodů do integrovaného obvodu, je vyžadováno minimum externích součástek. Řídicí část sbírá data z ostatních funkčních bloků a na základě zjištěných dat vyhodnocuje stav celého zařízení. Získané informace jsou poté uloženy v paměti a jsou dostupné pro uživatele prostřednictvím sběrnice SPI. V případě, že je v obvodu povoleno přerušení k nastavené události, dojde ke stáhnutí pinu EERRB k logické 0. Pro řízení rychlosti a směru otáčení krokového motoru slouží piny NXT a DIR. Po příchodu náběžné hrany signálu na pin NXT dojde k pootočení motoru o jeden krok. Změnou úrovně napětí na pinu DIR dojde ke změně směru otáčení. Pracovní napěťový rozsah integrovaného obvodu je 6-29V při teplotách od -40 do +165°C. Doporučené napájecí napětí je však 12V. Některé části obvodu vyžadují napájení 3,3 V. To je vyřešeno pomocí integrovaného zdroje.

2.1.1 SPI sběrnice

Mezi externí sběrnice, určené ke komunikaci mezi digitálními zařízeními po sériové sběrnici, řadíme i sběrnici SPI. Tato sběrnice si získala velkou oblibu díky její snadné implementaci a to jak pomocí hardwarové podpory přímo v periférii, tak i softwarové emulaci. Tato sběrnice umožňuje komunikaci dvou a více propojených zařízení. Na rozdíl od portu RS-232, který umožňuje komunikaci pouze mezi dvěma uzly. Přenosová rychlost sběrnice SPI, může dosahovat až rychlosti 70MHz, ale v běžném použití se používají rychlosti do 10MHz. Těchto rychlostí je dosaženo pomocí třetího vodiče, po němž je do všech komunikačních uzlů distribuován hodinový signál. Zařízení, které je na této sběrnici označováno jako Master se stará o plnou režii této sběrnice. Zařízení Master je i zdrojem hodinového signálu a zároveň pomocí dalšího signálu určuje se kterým obvodem probíhá komunikace. Ostatní zařízení připojené na tuto sběrnici se nazývají Slave.

V případě, že požadujeme využít sběrnici SPI v nejjednodušším zapojení, výrobce vyžaduje minimálně 4 vodiče. Dva vodiče se nazývají MOSI(Master Out Slave In) a MISO(Master In Slave Out). Dvoucestný přenos dat umožňuje Full duplexní provoz. Pro zachování synchronizace je nutné, aby obě zařízení měla stejný hodinový signál při komunikaci. To zajišťuje třetí vodič nazývaný se SCK(CLK). Ten je řízen pouze obvodem typu Master. Poslední vodič je označován jako SSEL (SS). Prostřednictvím tohoto vodiče určuje obvod typu master, se kterým obvodem typu Slave bude probíhat komunikace.



Obrázek 2 - Způsoby zapojení SPI sběrnice

V případě, že chceme propojit větší množství uzlů, jako například teplotní čidla, AD převodníky a LCD displeje zapojíme zařízení do sběrnice stejně jako na Obrázek 2. Na obrázku vidíme propojení více obvodů Slave pomocí dvou datových vodičů a hodinový signál. K určení, se kterým obvodem bude probíhat komunikace, se určuje

pomoci vodičů typu CS. Stejně jako u ostatních výběrových signálů, je zde použit invertovaný vstup. Cílové zařízení je vybráno logickou nulou (úroveň L), obvody se kterými nekomunikujeme zase logickou jedničkou (úroveň H). Tím jak bude počet obvodů typu Slave přibývat, poroste i počet vodičů z obvodu Master.

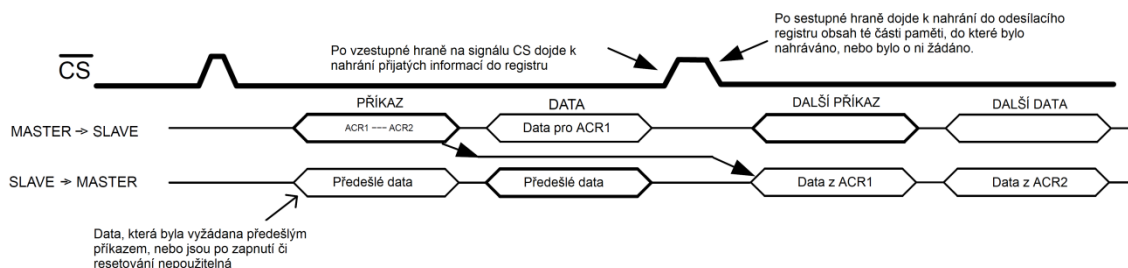
Mezi přednosti sběrnice SPI patří její jednoduchost a tím i snadná implementace. Při jednodušším pohledu na sběrnice SPI, si můžeme představit, že se jedná o několik externě propojených posuvných registrů. Jejich posun je řízen hodinovým signálem. Díky tomuto jednoduchému principu propojení a dodržení malých kapacit spojů, je možné dosáhnout rychlosti hodinového signálu až do frekvence 70MHz.

Nevýhodou je možnost použít pouze jediného zařízení v režimu Master. To je možné vyřešit použitím režimu multiple master, ale tím se ztrácí jednoduchost celé komunikace. Další nevýhodou je absence signálu ACK, kterým by zařízení indikovaly, že přijaly data a případně jsou připraveny odeslat již zpracovaná data[2].

2.1.2 Komunikace s NCV70514

V obvodu NCV70514 se nachází paměť o celkové kapacitě (velikosti) 18 bajtů. Ta je rozdělena na řídicí a stavovou část. Řídicí část je označována jako CRx a najdeme zde registry, které nastavují parametry pro funkční bloky. V této oblasti paměti má uživatel právo jak číst tak i zapisovat. Stavová část paměti je označována jako SRx a nachází se zde informace o stavu obvodu, zároveň se zde nacházejí výstupní hodnoty z jednotlivých funkčních bloků. Z této oblasti má uživatel právo pouze číst.

Komunikace s obvodem NCV70514 probíhá pomocí protokolu o velikosti dvou bajtů. V prvním bajtu se nachází informace o dvou adresách, do kterých chceme zapisovat, případně číst. Ve druhém bajtu je uložena hodnota, kterou chceme uložit do řídicí části v paměti. Během tohoto přenosu nám obvod posílá nazpět také dvojici bajtů. Hodnoty v těchto dvou bajtech, odpovídají hodnotám ze dvou adres, o které jsme žádali v předchozí komunikaci s obvodem, případně jsme do ní zapisovali[1].



Obrázek 3 - Ukázka způsobu komunikace s obvodem NCV70514 [1]

2.1.3 Detektor podpětí

V některých případech může dojít k poklesu napětí pod mez, kdy by mohl budič ztratit kroky, nebo dojít ke ztrátě kontroly nad motorem. Z tohoto důvodu jsou budiče vybaveny obvodem pro detekci podpětí. V obvodě NCV70514 se nachází detektor podpětí s třemi různými úrovněmi napájecího napětí. Tyto úrovně jsou označovány UV1, UV2 a UV3. První dvě z nich jsou programovatelné pomocí SPI rozhraní a třetí je pevně daná. Hodnotu, při které je vyvoláno přerušení, je možné nastavit v 16 krocích v registrech UV1Thr a UV2Thr. Přesný popis prahových hodnot najdete v Tabulka 1.

Za okolnosti, že dojde k překročení jakékoliv prahové hodnoty napětí, bude ve stavové paměti obvodu uložena informace, že k této události došlo. V případě, že jsou povoleny indikace přerušením a dojde k příchodu následujícího NXT impulsu, dojde k nastavení pinu ERRB do logické 0. Tento stav pinu a paměti zůstává uložen, dokud nedojde k vyčtení stavových registrů ze stavové paměti.

Při překročení prahové hodnoty UV1, nedojde k žádnému omezení funkčnosti řadiče, ale je doporučeno pomalu zastavovat krokový motor, aby nedošlo ke ztrátě kontroly nad motorem.

Dojde-li k překročení prahové hodnoty napětí v bloku UV2 dojde k zastavení motoru a řadič začne ukládat neprovedené NXT pulzy do registru SI.

Poklesne-li prahové hodnoty napětí pod úroveň UV3. Obvod vypne výstupní budič motoru a nastaví bit MOTEN na logickou 0. Tím dojde k uvolnění rotoru motoru a možnému volnému samovolnému pootočení motoru. Po příchodu následujícího NXT pulzu a pokud jsou povoleny indikace přerušením, dojde k nastavení pin ERRB do logické 0. Tento stav pinu a paměti zůstává uložen, dokud nedojde k jejímu vyčtení stavové paměti. V okamžiku opětovného vzrůstu napětí nad prahovou hodnotu v bloku UV3, může být výstupní driver opět uveden do provozu nastavením parametru MOTEN na logickou jedničku. Tím dojde k opětovnému převzetí kontroly nad motorem[1].

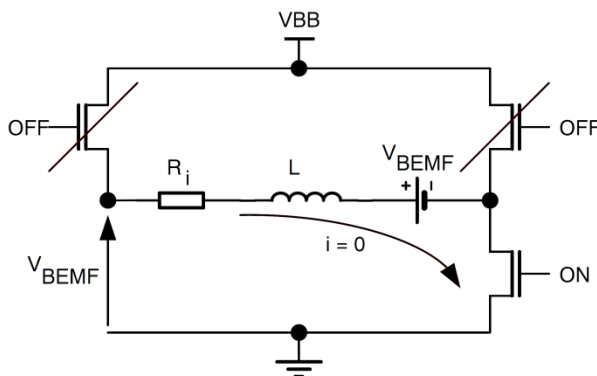
Hodnota v registru	Odpovídající hodnota napětí (V)
0	5,98
1	6,31
2	6,65
3	6,98
4	7,31
5	7,64
6	7,97
7	8,31

Hodnota v registru	Odpovídající hodnota napětí (V)
8	8,64
9	8,97
A	9,3
B	9,63
C	9,97
D	10,3
E	10,63
F	10,96

Tabulka 1 - Prahové hodnoty napětí pro obvody signalizující nízká napětí [1]

2.1.4 Detektor pohybu motoru.

Důležitým blokem řadiče krokového motoru je snímač zpětnovazebního napětí. Jeho funkcí je měřit aktuální hodnotu BEMF na cívkách krokového motoru. Popis vzniku BEMF napětí a jeho výpočty najdete v kapitole 5.1. Měření tohoto napětí může probíhat pouze v době, kdy dochází ke změně směru proudu v cívce. Je nazýván průchod nulou. V tento okamžik je jeden konec cívky připojena k zemi a na druhém konci můžeme naměřit napětí BEMF. Tento stav vidíme na Obrázek 4 - Schéma zapojení při měření napětí BEMF[3].



Obrázek 4 - Schéma zapojení při měření napětí BEMF[3]

Samotné vzorkování napětí však může probíhat pouze za určitých podmínek. Mezi tyto podmínky patří okamžik, kdy PWM signál, kterým je buzena druhá cívka, je v logické 0. Tím dochází k menšímu rušení během vzorkování napětí BEMF. V základním nastavení obvodu probíhá vzorkování před samotným opuštěním nulové hodnoty proudu na cívce. V případě, že chceme vzorkovat a uložit hodnotu napětí i v době před opuštěním nulové hodnoty proudu, musíme v registru CR3 nastavit bit EndBemf_En do log.1. Další podmínku je frekvence impulzů na pinu NXT, pod kterou nebudou probíhat měření. Tato frekvence se nastavuje pomocí registru SpThr. Výsledné navzorkované napětí je převedeno na 5-bitovou hodnotu a uloženo do paměti. Poté dojde k nastavení bitu BemfRes v registru SR2 do log.1. V bloku se nachází i kontrola polarit naměřeného napětí. V případě, že je polarita napětí opačná, než předpokládaná polarita, dojde k nastavení bitu Bemfs do log.1. Tímto bitem můžeme zjistit, jestli nedochází k rezonování rotoru motoru. Hodnota napětí BEMF odpovídá vzorci[1]:

$$BEMF_{hodnota} = V_{MOT_XorY_diff}(V) \cdot Zesílení \cdot \frac{5}{4} \cdot \frac{2^5}{2.41}$$

Detektor funguje i v okamžiku vypnutých výstupních můstků. Díky tomu obvod rozpozná neřízené otáčení motoru. V případě, že pohyb motoru vygeneruje napětí větší než nastavené prahové napětí v registru SpThr, dojde k nastavení logické 0 na pinu ERRB.

2.1.5 Ochranné a doplňkové funkce

Obvod NCV70514 má několik ochranných obvodů zabraňujících k zničení samotného budiče krokových motorů, případně krokového motoru. Mezi funkce ochranných a doplňkových obvodů patří:

- Automatická detekce připojeného/nepřipojeného krokového motoru
- Ochrana proti zkratu a rozpojení na výstupních pinech
- Ochrana proti přehřátí a automatické vypnutí obvodu
- Detekce chyb při komunikaci po sběrnici SPI
- Režim spánku
- Reset po zapnutí a kompletní reset

2.1.6 Výstupní H-můstek s PWM regulací

Obvod NCV70514 využívá k řízení krokových motorů mosfety v zapojení typu H-můstek. Každý H-můstek se skládá ze dvou MOSFETů typu P připojených k napájecí větvi a dvou MOSFETů typu N připojených ke GND. Odpor spodních mosfetů typu N ($R_{ds(on)}$) je při sepnutém stavu, využíván k měření protékajícího proudu. Tato informace se používá při výpočtu šířky impulzu PWM. Generátor PWM signálu pro motor, je synchronizován s vnitřními hodinami v čipu, kdy po každém cyklu PWM vyčte aktuální hodnotu šířky impulzu z registrů. Perioda PWM signálu není závislá na napájecím napětí. Díky zpožděnému sepnutí mezi horním a spodním tranzistorem nemůže dojít k sepnutí obou tranzistorů zároveň a tím k zničení obou tranzistorů. Velikost proudu tekoucí do cívky je možné nastavit v registru CR2. Obvod NCV70514 rozděluje dva stavy, kdy do motoru pouští maximální proud. První stav je v době, kdy je žádoucí motor udržet v současné pozici a je třeba zabránit samovolnému otáčení. Nazývá se lhold. Druhý stav nastává v případě, že motor přepneme do režimu otáčení. Tento stav se jmenuje lrun. Mezi těmito stavy můžeme přepínat pomocí pinu RHB, případně negovat logiku tohoto pinu pomocí bitu RHBP v registru CR1. Registr CR2 dvojici registru lrun a lhold. V registru lrun se nastavuje maximální proud tekoucí do cívky při otáčení motoru a v registru lhold proud při stání. Velikosti proudu jsou uvedeny v Tabulka 2 - Seznam hodnot odpovídající proudu při stavu lhold a lrun[1].

Samotné zapnutí a vypnutí výstupního můstku je možné řídit bitem MOTEN v registru. Pokud je nastaven na logickou 0, dojde k vypnutí H-můstku a motorem neprochází žádný proud. Pokud dojde k zapsání log. 1, zapne se funkce H-můstku a cívka motoru začne téct přídržný proud[1].

Hodnota v registru	Maximální proud při otáčení motoru [mA]	Maximální proud cívkou při zastavení motoru[mA]
0	59	0
1	71	59
2	84	71
3	100	84
4	119	100
5	141	119
6	168	141
7	200	168
8	238	200
9	283	238
A	336	283
B	400	336
C	476	400
D	566	476
E	637	566
F	800	637

Tabulka 2 - Seznam hodnot odpovídající proudu při stavu Ihold a Irun[1]

2.1.7 Krokový mód

K volbě krokového režimu slouží bity SM0-2 v registru SR3. Máme na výběr z několika módů, kdy nejhrubší mód je čtyřtaktní. Nejemnější krokování je se jmenuje mikrokrokování, někdy bývá označeno hodnotou 1/32, kdy je každý standardní krok krokového motoru rozdělen na dalších 32 kroků. V případě resetu, nebo připojení napájecího napájení, se registr nastaví na nejemnější hodnotu krokování. Aktuální pozici natočení motoru, můžeme vyčíst z registru MSP. Jedná se o 7 bitový registr, kde každý bit reprezentuje pozici natočení pro různé mody krokování. Pokud dojde k volbě hrubšího kroku, nejnižší používání bit MSP registru se nastaví do log. 0 a aktuální hodnota natočení odpovídá vyšším bitům. V případě, že se zrovna nacházíme na pozici mimo tabulku nově nastaveného krokování, je automaticky zvolena nejbližší hodnota podle směru otáčení motoru. Pokud nastavíme jemnější krokový režim, začne se pro ukládání aktuální polohy používat i nižší bit.

2.2 Krokový motor

Krokový motor je stejnosměrný motor, který po připojení napájení na jednu z cívek vykoná otáčku pouze o jediný krok. Velikost tohoto kroku souvisí s počtem pólů krokového motoru. Aby docházelo k plynulému otáčení určitým směrem, musíme přivádět do jednotlivých cívek proud tak, aby se při pootočení rotoru správně nastavily jednotlivé póly. Řízení takového typu motoru vyžaduje externí spínací obvod, který zajistí správnou posloupnost sepnutí jednotlivých cívek. Rychlost otáčení krokových motorů, případně jejich přesné natočení je dána frekvencí impulsů, které přivádíme do cívek. To umožňuje velice přesné ovládání a kontrolu motoru[4].

Výhody

- Úhel natočení krokového motoru je dán počtem impulsů
- Motor je možné přivedením stálého proudu do cívek zastavit
- Přesné polohování a jeho opakovatelnost
- Velmi dobrá odezva při otáčení, brždění a změně směru
- Velmi vysoká spolehlivost
- Bezkartáčové provedení
- V některých případech použití je možné ovládat motor bez zpětné vazby (otevřený systém)

Nevýhody

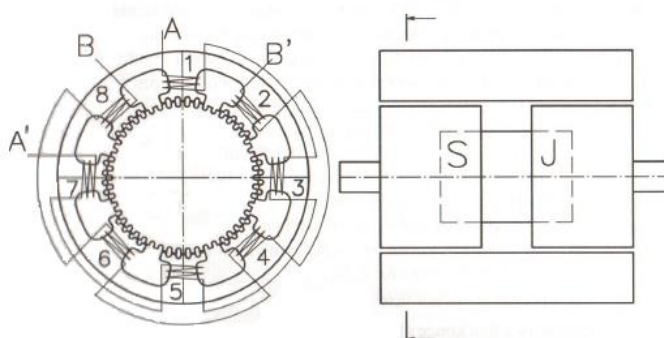
- Složitě řízení při vyšších rychlostech
- Při nesprávném řízení může dojít k rezonanci (chvění rotoru)
- Poměr výkonu vůči velikosti motoru
- Vyšší cena ve srovnání s obyčejnými DC motory

2.2.1 Hybridní krokový motor

Hybridní krokový motor patří k nejužívanějšímu typu krokového motoru současnosti. Stator tvoří osm hlavních pólových nástavců, z nichž každý je dále rozdělen na 5 zubů. Každý hlavní pólový nástavec má svoje vinutí cívky. Rotor hybridního krokového motoru je vyroben z hřídele z magnetické oceli, na které jsou nalisovány dva pólové nástavce složené z plechu. **NaChyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Obrázek 5 - Hybridní krokový motor [2] je mezi těmito pólovými nástavci vidět uložení permanentního magnetu. Tyto motory jsou nazývány krokové motory s aktivním rotorem s axiálně polarizovaným permanentním magnetem. Pólové nástavce jsou rozděleny na 50 zubů o stejné šířce jako rotorové.

2.2.2 Princip otáčení krokového motoru

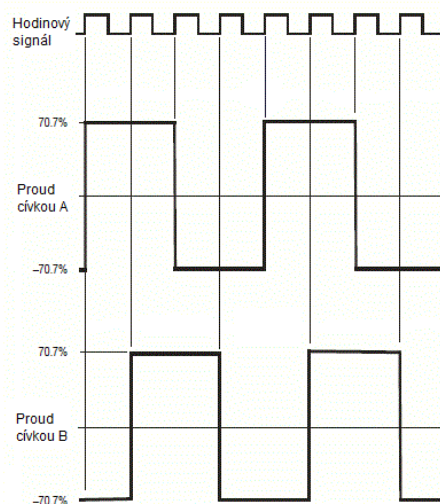
Pokud cívkami v motoru neprotéká žádný proud, je magnetické pole tvořeno permanentním magnetem umístěným v rotoru. Tímto magnetickým polem je rotor aretován do určité klidové polohy. I když se motor jeví jako dvou cívkový, ve skutečnosti je v motoru celkem 8 cívek, které jsou zapojené do dvou sériových obvodů. Cívku A z Obrázek 5 - Hybridní krokový motor [2] tvoří cívky 1,3,5, a 7 a cívku B tvoří cívky 2,4,6 a 8. Když cívkou A protéká proud, dojde k zmagnetizování jednotlivých nástavců. Ty přitáhnou/odpudí zuby na rotoru a dojde k pootočení rotoru tak, aby zuby byly přímo proti sobě. Tomuto pootočení říkáme krok. V okamžiku kdy cívku A vypneme, dojde k odmagnetizování jednotlivých nástavců a uvolnění rotoru. Po přivedení proud do cívky B, dojde k zmagnetizování druhých nástavců a děj se opakuje. Hřídel se díky tomuto postupnému působení magnetických sil otáčí směrem, který si zvolíme podle postupného spínání jednotlivých cívek. V případě že zvolíme sekvenci $+A, -B, -A, +B, +A$, bude se otáčet rotor jedním směrem a pokud zvolíme sekvenci $+A, +B, -A, -B, +A$, bude se otáčet druhým směrem. Tento způsob řízení se nazývá čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze a bipolárním napájením[2][4].



Obrázek 5 - Hybridní krokový motor [2]

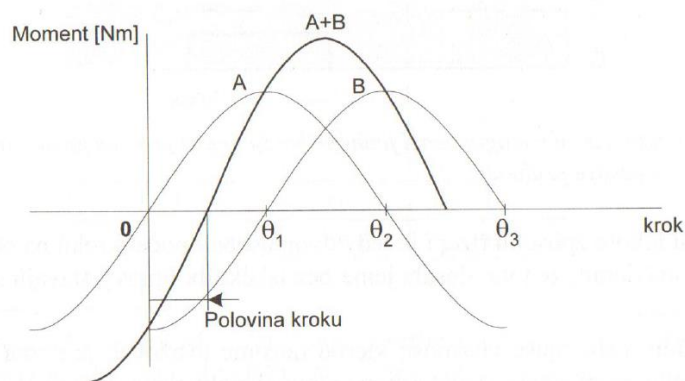
2.2.3 Čtyřtaktní řízení s magnetizací dvou fází

Jedná se způsob spínání jednotlivých fází, kdy jsou napájeny vždy dvě sousední fáze. Rovnovážná poloha rotoru leží mezi vybuzenými sousedními pólovými nástavci statoru a oproti způsobu řízení s magnetizací jedné fáze je vychýlená o polovinu kroku a to o $0,8^\circ$. Velikost kroku se však nemění a je $1,6^\circ$. Časový průběh spínání fází je tedy $+A+B - A+B -A-B +A-B$ pro jeden směr. Opačný směr je průběh spínání $+A+B +A-B -A-B -A+B$. [2]



Obrázek 6 - čtyřtaktí způsob řízení pomocí dvou fází [5]

Mezi výhody způsobu řízení pomocí čtyřtaktího řízení, je zvýšení statického vazebního momentu krokového motoru. To vidíme na Obrázek 7. Další výhodou je větší tlumení mechanických oscilací rotoru při krokování. Ty jsou způsobené vyšší strmostí výsledné statické momentové charakteristiky, což dovolí dosáhnout vyšších krokovacích frekvencí.

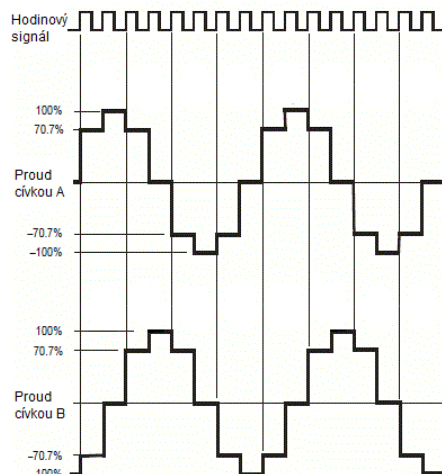


Obrázek 7 - Statická momentová charakteristika pomocí dvou cívek [2]

2.2.4 Osmitaktní řízení

Složením řízení čtyřtaktího s nastavitelným omezením proudu v cívkách vznikne osmitaktí řízení. Sekvence spínání je na Obrázek 8. V případě použití tohoto druhu řízení se rotor při jednom kroku pootočí o $0,4^\circ$.

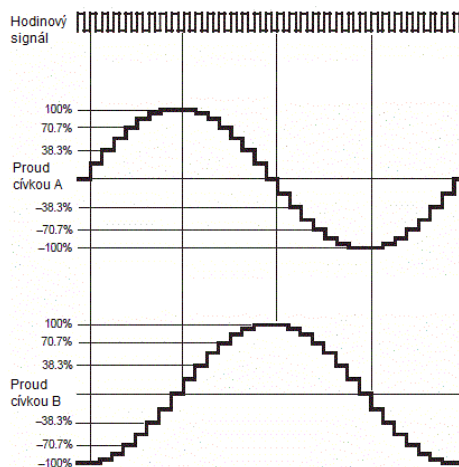
Výhodou tohoto osmitaktního řízení je dvojnásobný počet kroků na otáčku než v případě předešlého typu řízení. Nevýhodou tohoto řízení, je různá velikost maximálního momentu ve statické momentové charakteristice. Tato vlastnost se dá odstranit řízeným proudem v jednotlivých cívkách. Přesná velikost proudu závisí na velikosti kroku, nebo na vzdálenosti ploch statických momentových charakteristik sousedních fází. [8] [7]



Obrázek 8 - Osmitaktní řízení pomocí dvou cívek [5]

2.2.5 Mikro krokování

V určitých aplikacích je požadována jemná rozlišitelnost polohy krokového motoru (zlomky stupně), např. tiskárny, robotika, mikrotechnika, fytotechnika, atd. Zvětšením počtu fází nebo rotorových zubů může být zmenšen úhel kroku. V praxi je nevýhodné používat krokový motor s větším počtem fází než 4 a je obtížné vyrobit rotor s více než 100 zuby. Z tohoto důvodu jsou krokové motory s úhlem pod 1° výjimkou. V aplikacích, kde je potřeba použít jemnější krok, musíme docílit postupného natočení rotoru pomocí přesného řízení proudu do dvou cívek. Toto řízení vychází z magnetizace dvou fází a dělí každý krok na mikrokroky zpravidla stejné délky. U tohoto způsobu jsou velikosti proudů záměrně v jednotlivých mikrokrocích odlišné. Průběh velikosti proudu jsou na Obrázek 9. Vhodnou volbou a řízení vzájemných velikostí proudů se může dosáhnout libovolné klidové polohy mezi dvěma sousedními kroky. Tato rovnovážná poloha je určena poměrem proudů a také stejného, případně různého momentu dané velikostí proudů [2][5].



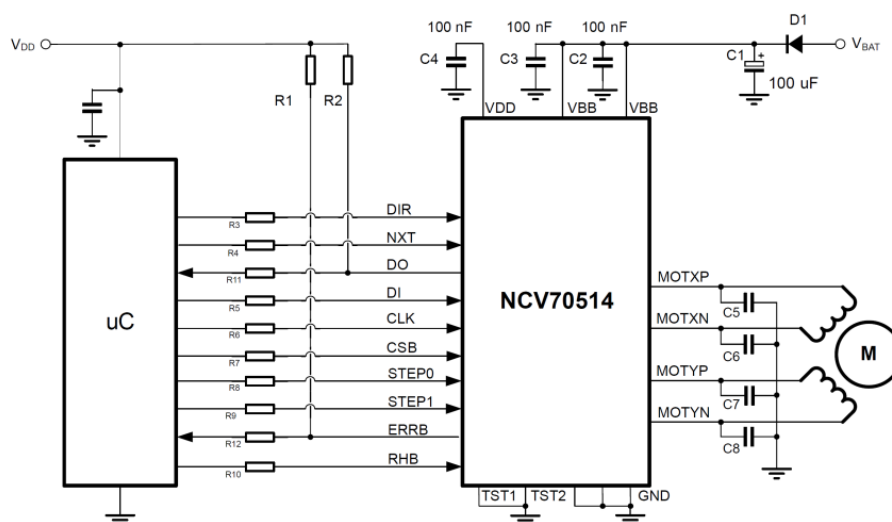
Obrázek 9 - Mikro krokování pomocí dvou cívek [5]

3 Prototyp

3.1 Návrh HW

3.1.1 Zapojení NCV70514

Při volbě zapojení obvodu NCV70514 vycházíme ze vzorového zapojení od výrobce, které vidíme na Obrázek 10 - Vzorové zapojení NCV70514 [1]. Ze zapojení můžeme vyčíst, že piny označené jako vstupní mají pouze sériový odpor sloužící jako ochranu nadproudu. Doporučenou hodnotou od výrobce je 1kOhm. Po zkušenostech s prototypem bylo rozhodnuto použít odpor 330R. Výstupní digitální piny integrovaného obvodu NCV70514 jsou v zapojení *otevřený kolektor*, proto je nutné na tyto piny přivést napájecí napětí, které odpovídá napájecímu napětí mikrokontroléru. Tento způsob zapojení umožňuje použít rozdílné napájecí napětí pro integrovaný obvod NCV70514 a mikrokontrolér. Maximální proud, který může tranzistorem procházet je 12mA. Pokud použijeme doporučený sériový odpor velikosti 1kOhm, bude proud tekoucí do tranzistoru 3,3mA. [1]



Obrázek 10 - Vzorové zapojení NCV70514 [1]

Z důvodu nedostatečného množství SPI sběrnic v mikrokontroléru, byl zvolen způsob zapojení více zařízení typu Slave na jedinou sběrnici. Ostatní řídicí piny, kromě sběrnic SPI, jsou přivedeny od každého řadiče k mikrokontroléru zvlášť.

Návrh samotného zapojení bez ochranných odporů je umístěn na vývojové desce spolu s filtračními kondenzátory. Vývojová deska je následně pomocí dvojice konektorů připojena k hlavní řídicí desce. Toto řešení bylo zvoleno, z důvodu možného použití i jiných integrovaných obvodů z rodiny NCV705XX. Obvodové zapojení a návrh plošného spoje obsaženy v Příloha 13 Schéma zapojení C524

3.1.2 Volba Mikrokontroléru

Při výběru mikrokontroléru, musíme zvážit několik kritérií. Mezi hlavní kritéria patří dostatečný výpočetní výkon samotného mikrokontroléru, velikost paměti SRAM pro ukládání naměřených hodnot a schopnost dostatečně rychle zpracovat informace z integrovaného obvodu[9].

Pro samotný návrh zapojení byl zvolen mikrokontrolér LPC4078FBD144 od firmy NXP. Jeho základními parametry jsou dle datasheetu[9]:

- Jádru Cortex-M4 architektury Harvard
- Maximální pracovní frekvence 120MHz
- 512kB Flash programové paměti
- Flash a EEPROM je programovatelný přes rozhraní JTAG
- 96kB SRAM, 64kB SRAM je možné adresovat přímo, dva bloky po 16kB jsou určeny pro DMA.
- 5 UART, 3 SSP(SPI), 3 I2C,
- Čtyři Čítače/ časovače, každý po 32 bitech
- Generátor systémových hodin
- 12 bit AD převodník
- Dvojice PLL násobiček. Jedna pro Jádru druhá pro USB
- Pracovní napětí 3,3V
- V pouzdře LQFP144

Z výpisu vlastností je patrné, že mikrokontrolér LPC4078FBD144 obsahuje čtyři 32 bitové časovače. Tři těchto časovačů, jsou výstupní piny připojeny na NXT piny řadiče krokových motorů. To umožňuje přímé řízení rychlosti otáčení krokových motorů, bez zatěžování CPU. Dále je k dispozici synchronní a asynchronní sériový kanál UART a 12 bitový AD převodník.

Při návrhu zařízení byla dále zohledněna možnost připojení několika rozšiřujících modulů. Mezi ně patří displej, bluetooth modul a konektor pro připojení mikro SD karty.

3.1.3 Komunikace s PC

Pro komunikaci s počítačem byl zvolen obvod FT232R od firmy FTDI. Jedná se o jednočipový převodník mezi sběrnicemi USB a UART. Při návrhu zapojení byly přidány ochranné prvky proti ESD. Obvod je galvanicky oddělený od ostatních částí zařízení. Komunikaci mezi nimi zajišťuje obvod ADUM4402. Jedná se o galvanický izolátor pro sběrnici UART[10],[11].

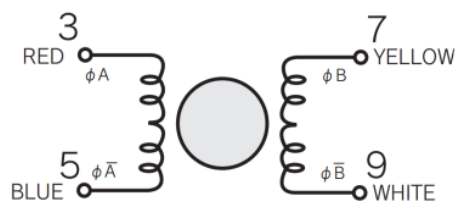
3.1.4 Krokový motor

Integrovaný obvod NCV70514 je navržen pro řízení dvou-cívkový krokových motorů. Pro tuto aplikaci byl zvolen krokový motor KH42HM2-951 od firmy SERVO. Jedná se o krokový motor s bipolárním zapojením cívek. Každá s cívek má odpor 3,1Ω, indukčnost 4,3mH s maximálním povolený proudem 1A. Další parametry a zapojení krokového motoru vidíme v Tabulka 3 a na Obrázek 11.[12]

M O D E L		KH42HM2			
	SINGLE SHAFT	-901	-902	-903	-951
	DOUBLE SHAFT	-911	-912	-913	-961
DRIVE METHOD	————	UNI-POLAR			BI-POLAR
NUMBER OF PHASES	————	2			2
STEP ANGLE	deg./step	1.8			1.8
VOLTAGE	V	3.06	5.57	6.76	3.10
CURRENT	A/PHASE	0.9	0.58	0.46	1.0
WINDING RESISTANCE	Ω/PHASE	3.4	9.6	14.7	3.1
INDUCTANCE	mH/PHASE	2.4	6.0	9.3	4.3
HOLDING TORQUE	mN · m	140	140	140	197
	oz · in	20	20	20	20
DETENT TORQUE	mN · m	11.8	11.8	11.8	11.8
	oz · in	1.7	1.7	1.7	2.1
ROTOR INERTIA	g · cm ²	38	38	38	38
	oz · in ²	0.21	0.21	0.21	0.21
WEIGHTS	g	200	200	200	200
	lb	0.44	0.44	0.44	0.57
INSULATION RESISTANCE	————	500VDC 100MΩmin.			
DIELECTRIC STRENGTH	————	500VAC 50HZ 1 min.			
OPERATING TEMP. RANGE	℃	0 to 50			
ALLOWABLE TEMP.RISE	K	70			

Tabulka 3 - Tabulka hodnot ke krokovému motoru KH42HM2-951 [12]

BI-POLAR



EXCITATION SEQUENCE

STEP	1	2	3	4
RED(3)	+	-	-	+
YELLOW(7)	+	+	-	-
BLUE(5)	-	+	+	-
WHITE(9)	-	-	+	+

Obrázek 11 - Vnitřní zapojení krokového motoru [12]

3.1.5 Návrhové prostředí

Pro návrh obvodového zapojení byl vybrán profesionální návrhový program Altium Designer 14.3 ve studentské verzi. Návrh obvodové zapojení ukázkového zařízení lze nalézt v Příloha 1 Schéma zapojení C514_EVB – Mikroprocesor. Zapojení řadiče krokových motoru naleznete v Příloha 13 Schéma zapojení C524.

Návrh plošného spoje byl také vytvořen v programu Altium Designer. Deska plošného spoje zařízení byla navržena jako dvouvrstvá s oboustranným rozmístěním součástek. Návrh desky vidíme v Příloha 8 Návrh plošného spoje C514_EVB - Vrstva TOP Příloha 9 Návrh plošného spoje C514_EVB - Vrstva BOTTOM Na obou vrstvách bylo provedeno rozlití země, která je připojena k nulovému potenciálu. Rozmístění součástek vidíme v Příloha 10 Návrh plošného spoje C514_EVB - Rozmístění součástek TOP Příloha 11 Návrh plošného spoje C514_EVB - Rozmístění součástek BOTTOM

3.2 Návrh SW

3.2.1 Vývojové prostředí

Pro možnost programování bylo vybráno vývojové prostředí Keil uVision 5 ve studentské verzi. Toto vývojové prostředí bylo vyvinuto firmou Keil a je určeno pro několik druhů mikroprocesorů. Jako programovací jazyk byl zvolen jazyk C. Pro kompilace kódu napsaného v jazyce C je nutné mít v programu propojený kompilátor. Ten je dodán výrobcem při instalaci. K usnadnění programování byly do projektu přidány rozšiřující softwarové balíčky CMSIS CORE a Startup. Tyto balíčky umožňují základní obsluhu periférií a základní nastavení hodinových signálů v mikrokontroléru.

3.2.2 Grafické prostředí

Pro návrh grafického prostředí byl zvolen program Qt, který vyniká jednoduchou a intuitivní obsluhou. Jedná se o vývojové prostředí podporující multiplatformní systémy a embedded systémy. Zároveň je podporováno několik programovacích jazyků. Mezi ně patří jazyky C, C#, Python, QML, HTML5 a JavaScript.

4 Ovládací program

4.1 Popis ovládacího programu a použití Qt

Pro snadnější obsluhu a nastavení řadiče krokových motorů byl vytvořen obslužný program v prostředí Qt. Program se skládá z hlavního okna, kde jsou tři sloupce reprezentující jednotlivé motory. V každém ze sloupců jsou umístěny ovládací prvky pro nastavení jednotlivých bitů v paměti řadiče. Ty jsou rozmístěny tak, že odpovídají paměťovému rozložení. Hlavní okno programu vidíme na Obrázek 12 - Hlavní okno ovládacího programu.



Obrázek 12 - Hlavní okno ovládacího programu

Po spuštění programu se otevře hlavní okno, kde v horní liště najdeme trojici ikon. Za ikonou ozubeného kolečka najdeme nastavení sériové linky. V levé části se nachází aktuální seznam volných sériových portů. Pro správnou komunikaci s deskou zvolíme nastavení rychlost 115200bd, s velikosti slova 8 bajtů, bez parity a jeden stop bit. Kliknutím na tlačítko „Použít“ je nastavení sériové linky dokončeno.

V hlavní ovládací okno je rozděleno do několika částí. V horní části najdeme editační pole pro odesílání parametru pro jednotlivé motory. Do jednotlivých pozic zadáme číslo motoru, hodnotu adresy a data, která chceme poslat. Pro odeslání slouží tlačítko „Odeslat“. Poslední odeslaná data jsou zobrazena v předposledním editačním poli. Dále má uživatel na výběr ze dvou režimu, sloužící ke změně průběhu otáčení.

Ve zbylé části okna se nachází tři sloupce, které představují 3 řadiče motoru. Ty odpovídají i rozmístění řadičů na plošném spoji. V každém ze sloupců se nachází bloky reprezentující jednotlivé registry a ovládací prvky pro jejich nastavení. Příkazy pro změnu nastavení v řadičích se dějí okamžitě po změně hodnoty.

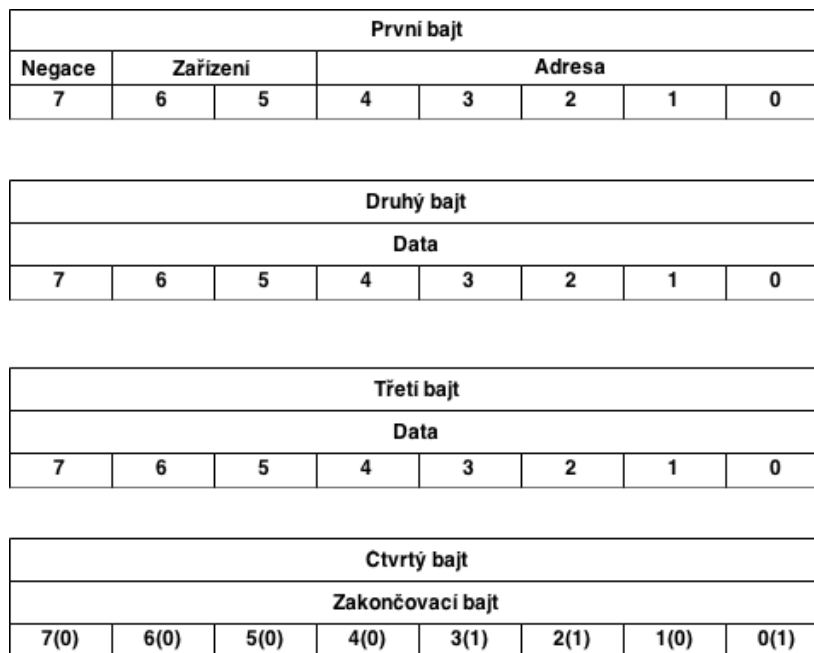
4.3 Datový protokol pro komunikaci mezi počítačem a mikrokontrolérem

Pro odesílání řídicích příkazů z počítače do mikrokontroléru byl vytvořen komunikační protokol. Ten se skládá ze čtyř bajtů, kde první slouží k adresaci dat. Následující dva bajty nesou hodnotu pro uložení do příslušné adresy. Poslední bajt reprezentuje konec zprávy. Rozložení jednotlivých bajtů je na Obrázek 13 - Komunikační protokol mezi ovládacím programem a mikrokontrolérem

První bajt je rozdělen do 3 částí. První bit reprezentuje negaci datového bajtu. Tento bit se nastaví do log. 1, pokud je aspoň jeden z datových bajtů roven 0. Další dva bity reprezentují adresu zařízení, pro které jsou data určeny. Jejich hodnoty vidíme v Tabulka 4 - Adresace zařízení

Adresa zařízení	Zařízení
0	Motor1
1	Motor2
2	Motor3
3	Mikrokontrolér

Tabulka 4 - Adresace zařízení



Obrázek 13 - Komunikační protokol mezi ovládacím programem a mikrokontrolérem

5. Měření

5.1 Teorie o BEMF a vliv prostředí na jeho hodnotu

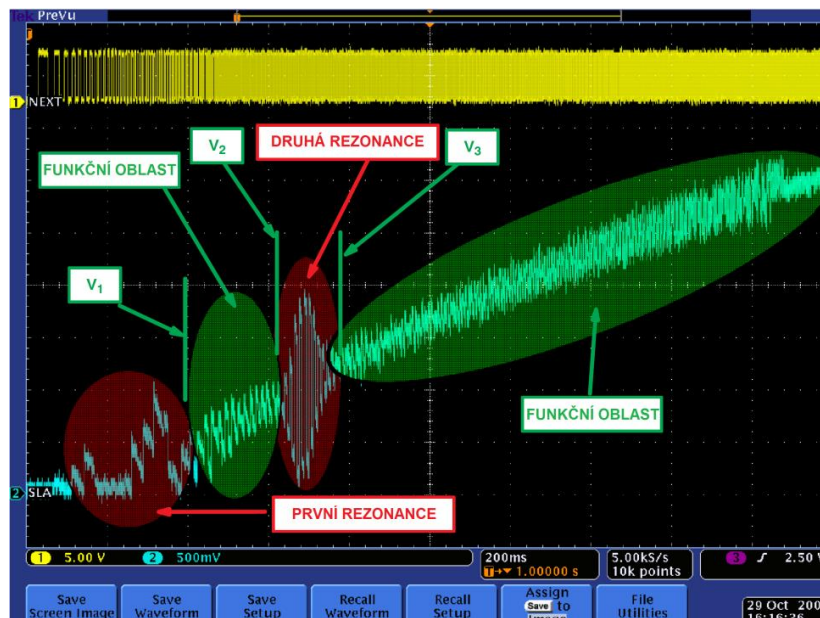
Napětí na motoru můžeme vyjádřit jako sériové zapojení odporu, indukce a zdroje napětí BEMF. Na základě tohoto tvrzení můžeme rovnici[13]:

$$V_{Motor} = i_{Motor} \cdot R_{vinutí} + BEMF + L_{vinutí} \frac{di_{Motor}}{dt}$$

V případě, že se motor netočí, bude proud v cívce závislý pouze na odporu vinutí. Ostatní prvky budou nulové. V okamžiku změn proudu v cívce vyvolaný pomocí PWM signálu dojde ke změnám proudu ve vinutí a začne se uplatňovat velikost indukce na cívce. V okamžiku otáčení motoru dojde ke generování napětí na cívkách motoru, způsobené změnou magnetického pole. Toto napětí je označováno jako BEMF a jeho hodnotu můžeme odvodit podle rovnice[13]:

$$BEMF(V) = -N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$

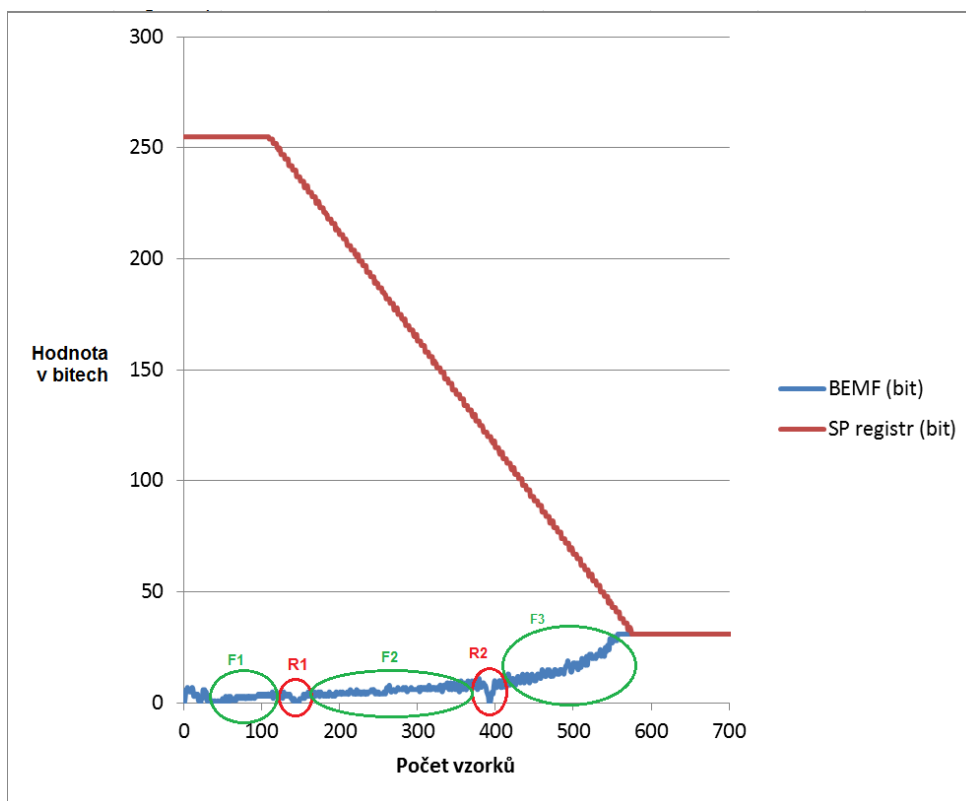
Kde N reprezentuje počet závitů vinutí, B velikost magnetického pole, A plochu jádra vinutí a ω úhlovou rychlost otáčení motoru. Protože motor má stálý počet závitů a plocha v jádře se nemění, můžeme proměnné N a A brát jako konstanty. Velikost magnetického pole cívky je dána permanentními magnety umístěnými v rotoru motoru. Proto i tuto proměnnou můžeme brát jako konstantu. Na základě toho úsudku můžeme tvrdit, že hodnota BEMF je pouze závislá na rychlosti změn magnetického pole v motoru, ale jak vidíme na Obrázek 14 - Průběh závislost BEMF na frekvenci krokování, vyskytují se v průběhu hodnot BEMF rezonance, způsobené vlastní rezonancí motoru[3].



Obrázek 14 - Průběh závislost BEMF na frekvenci krokování[3]

5.2 měření BEMF na rychlosti otáčení

Na základě předešlých informací, je nutné vytvořit profil motoru pro konkrétní nastavení. Bylo vybráno nastavení registrů $I_{run}=12, SM=2$ (1/8 krok), $BemfGain=0,5$. Průběh hodnot BEMF spolu s hodnotou registru SP vidíme na Obrázek 15 - Změřená hodnota BEMF na frekvenci krokování

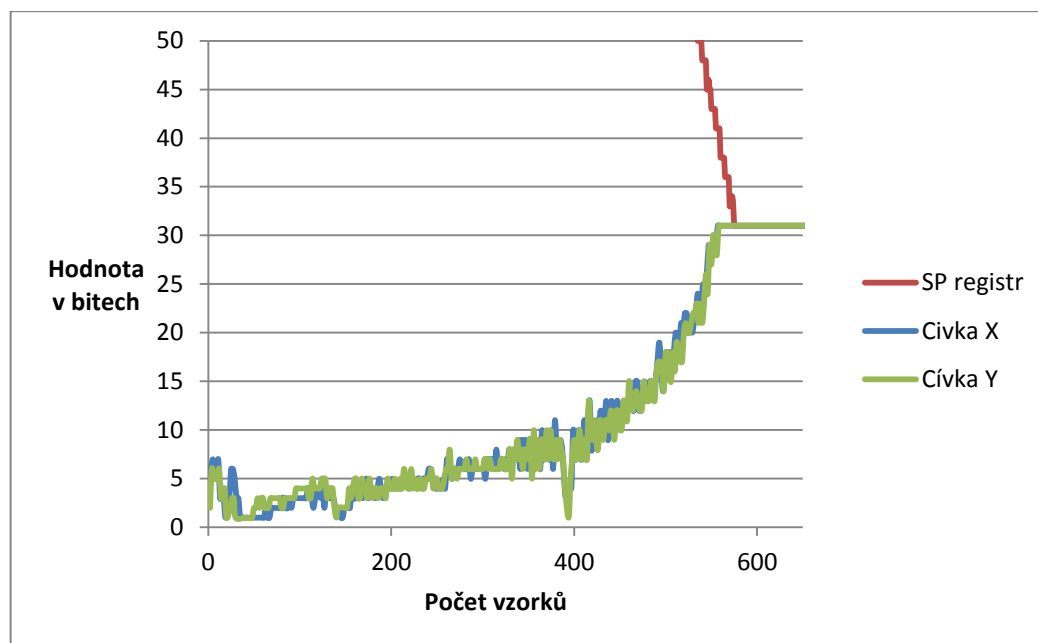


Obrázek 15 - Změřená hodnota BEMF na frekvenci krokování

V grafu vidíme průběh hodnoty z registru Sp a BEMF. Hodnota uložená v registru Sp je závislá na frekvenci impulsů na pinu NXT. Průběh hodnot BEMF můžeme rozdělit do několika oblastí. Oblasti označované jako R1 a R2 označují situaci, kdy dochází k vlastní rezonanci krokového motoru. V těchto oblastech není možné řídit krokový motor na základě hodnot BEMF. Ve funkčních oblastech označené F1, F2 a F3 jsou hodnoty BEMF odpovídající předpokládanému průběhu.

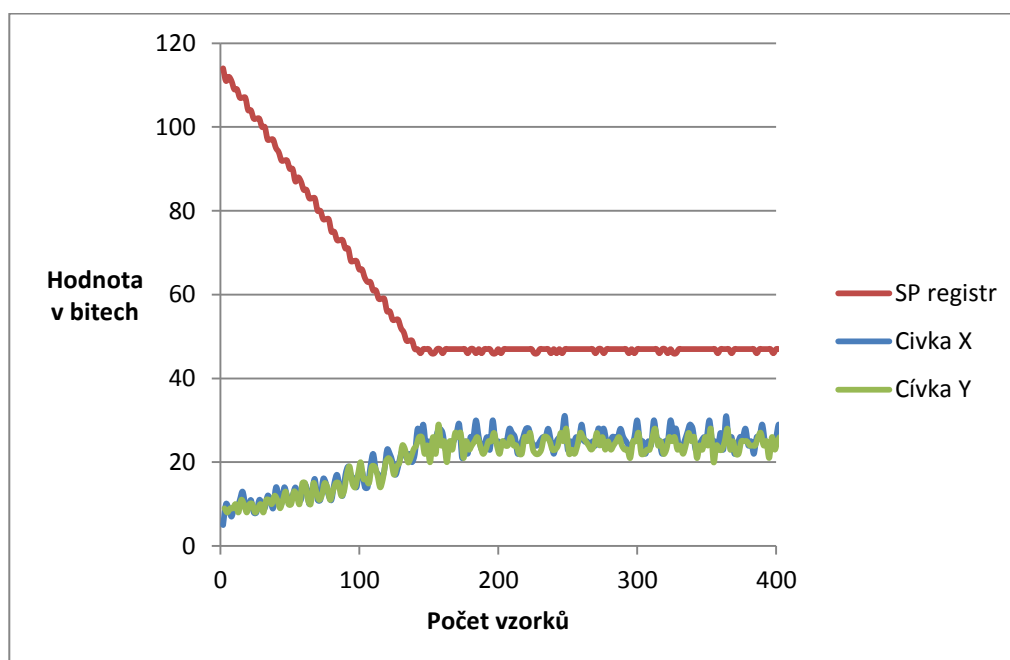
Spodní mez funkční oblasti F1 odpovídá v registru Sp hodnotě 116. Po uložení této hodnoty do registru SpThr, bude probíhat měření hodnot BEMF, až po poklesu hodnoty v registru Sp pod tuto mez. Horní mez oblasti F1 je omezena maximální rozlišovací hodnotě registru BEMF. Ta odpovídá v registru Sp hodnotě 41. Pro správnou funkčnost algoritmu pro řízení krokového motoru na základě BEMF, je třeba provozovat motor v oblasti F1.

Data přicházející z detektoru pohybu můžeme rozdělit na hodnoty BEMF z obou cívek. Výsledný graf vidíme na Obrázek 16 - Porovnání hodnot BEMF z obou cívek. Z průběhu grafu vidíme rozdílnost hodnot z obou cívek. Rozdíl hodnot z jednotlivých cívek je způsoben časový rozdílem měření a odlišnými parametry obou cívek.



Obrázek 16 - Porovnání hodnot BEMF z obou cívek

Na základě předešlých naměřených hodnot, byla vytvořena funkce rychlosti otáčení krokového motoru. Jeho průběh vidíme na Obrázek 17 – Průběh hodnot BEMF při rampovém průběhu. Tato funkce je využita při dalších měření.



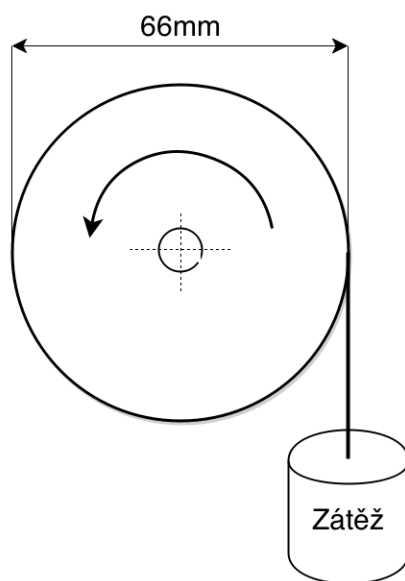
Obrázek 17 – Průběh hodnot BEMF při rampovém průběhu

5.3 měření BEMF na velikosti zatížení motoru

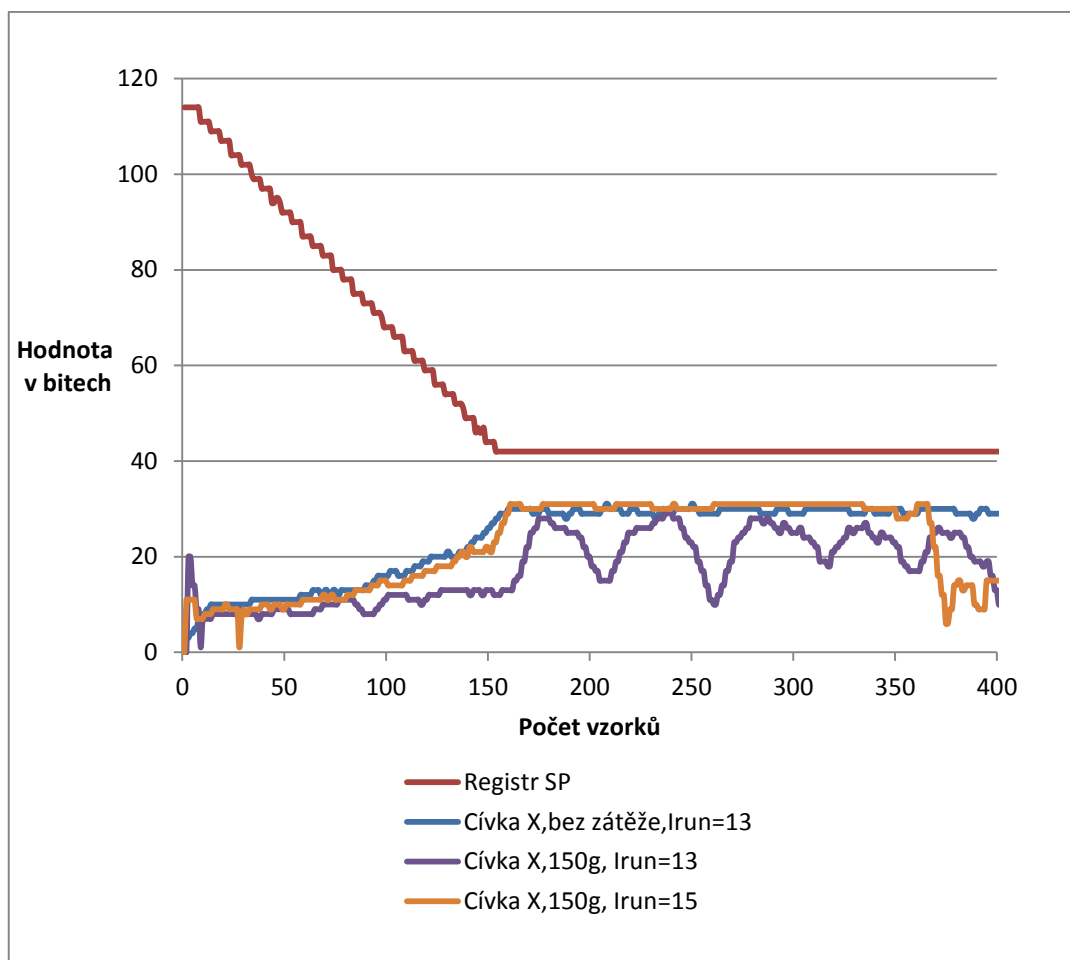
Pro testování různé velikosti zátěže na ose, byla sestavena měřicí soustava skládající se z hřídele, na kterou je umístěna kladka. Na kladce je zavěšeno závaží, které svou vahou a třením vytváří moment síly působící proti otáčení motoru. Obrázek sestavy najdete na **Chyba! Chybný odkaz na záložku.** Jako zvolenou zátěž bylo použito závaží o tíze 50,100 a 150g. Velikost momentové síly najdete v Tabulka 5 - Seznam použitých zátěží

Zátěž [g]	Momentová síla[Nm]
50	0.0165
100	0.033
150	0.0495

Tabulka 5 - Seznam použitých zátěží



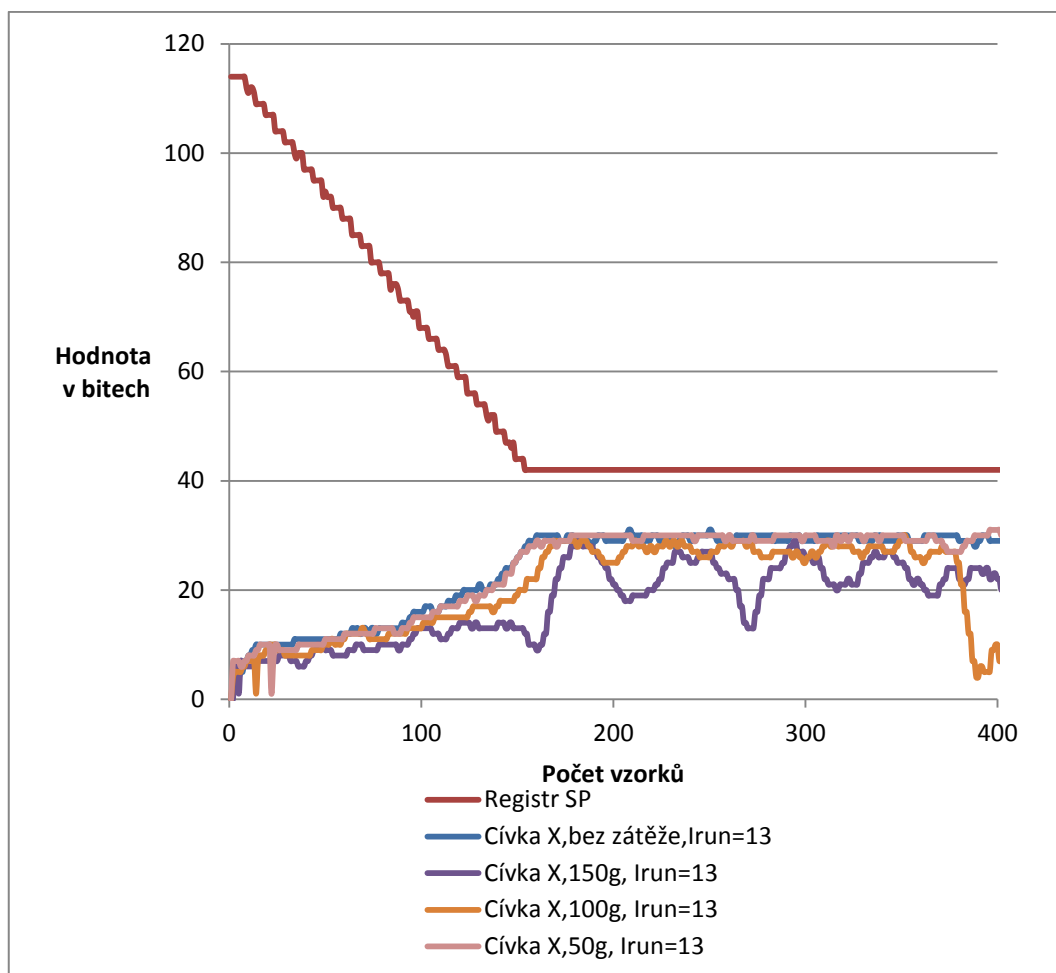
Obrázek 18 - Měřicí soustava



Obrázek 19 - Průběh BEMF pro při změně zátěže a proudu

Z průběhu grafu na Obrázek 19 - Průběh BEMF pro při změně zátěže a proudu můžeme vyčíst vliv proudu na hodnotu BEMF. Po zatížení hřídele 150g závažím došlo k poklesu hodnoty BEMF. V případě opakování testu při nastavení vyššího proudu, odpovídá hodnota registru BEMF stavu bez zatížení hřídele. Tímto měřením byl ověřen vliv velikosti proudu na hodnotě BEMF.

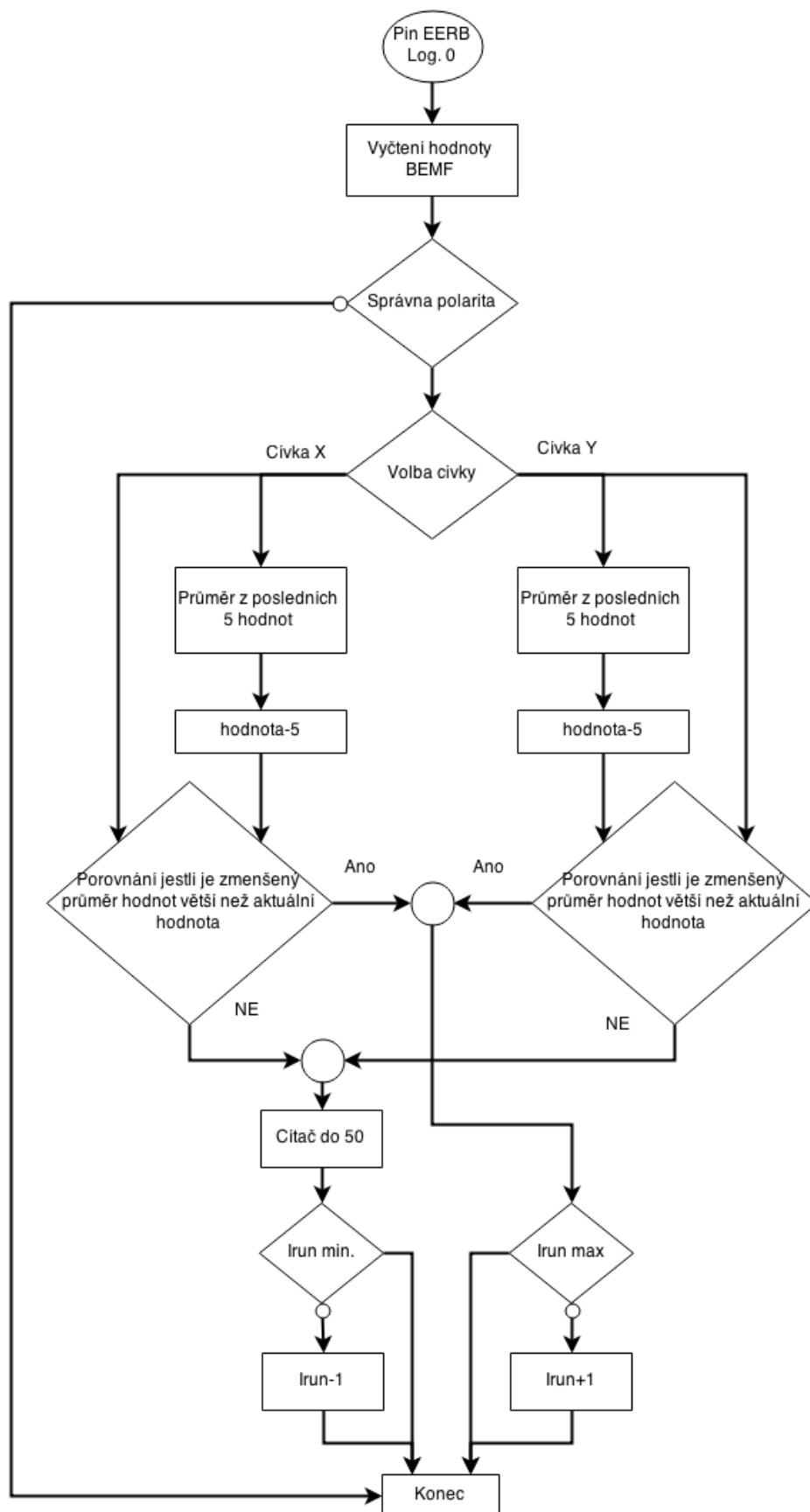
Na Obrázek 20 - Vliv velikosti zátěže na průběh BEMF při konstantním proudu cívkou vidíme výsledky měření průběhu hodnot registru BEMF na základě rozdílného zatížení hřídele. Toto měření bylo prováděno při stejné hodnotě proudu pro všechna měření. Z jednotlivých průběhu hodnot BEMF můžeme vyčíst vliv poklesu hodnot BEMF pro rozdílnou zátěž. Data získána z měření budou sloužit k vytvoření algoritmu pro řízení krokového motoru.



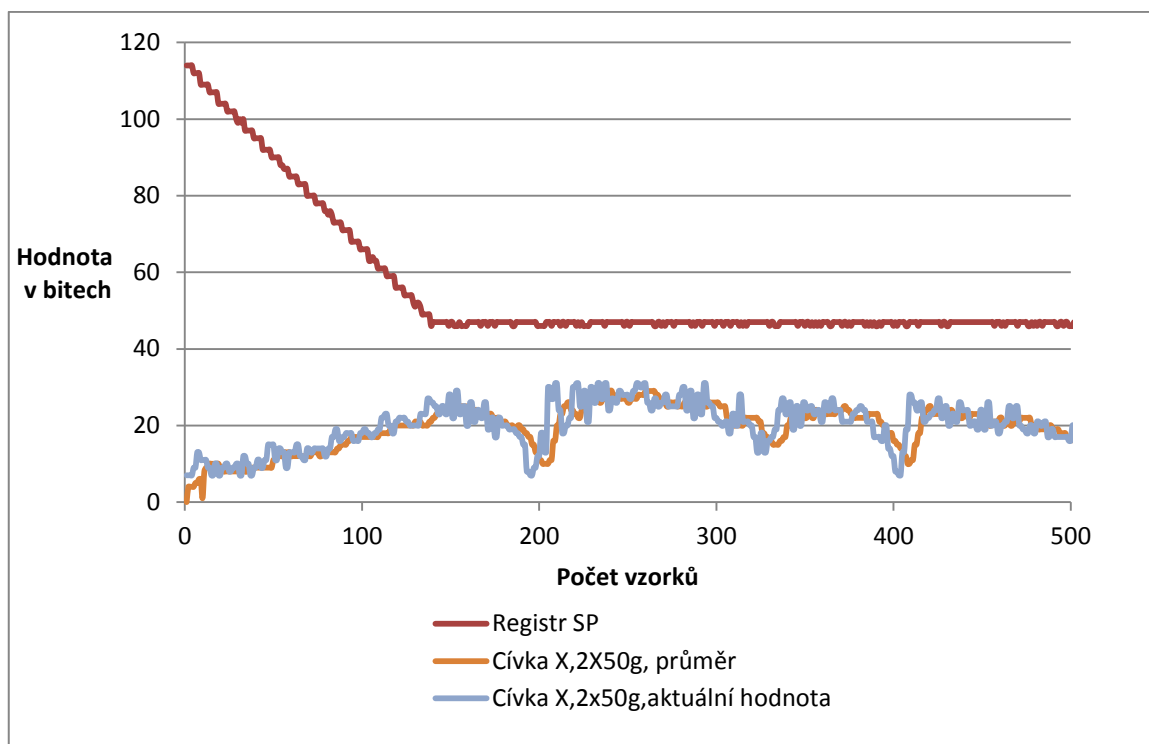
Obrázek 20 - Vliv velikosti zátěže na průběh BEMF při konstantním proudu cívkou

6 Algoritmus pro řízení proudu

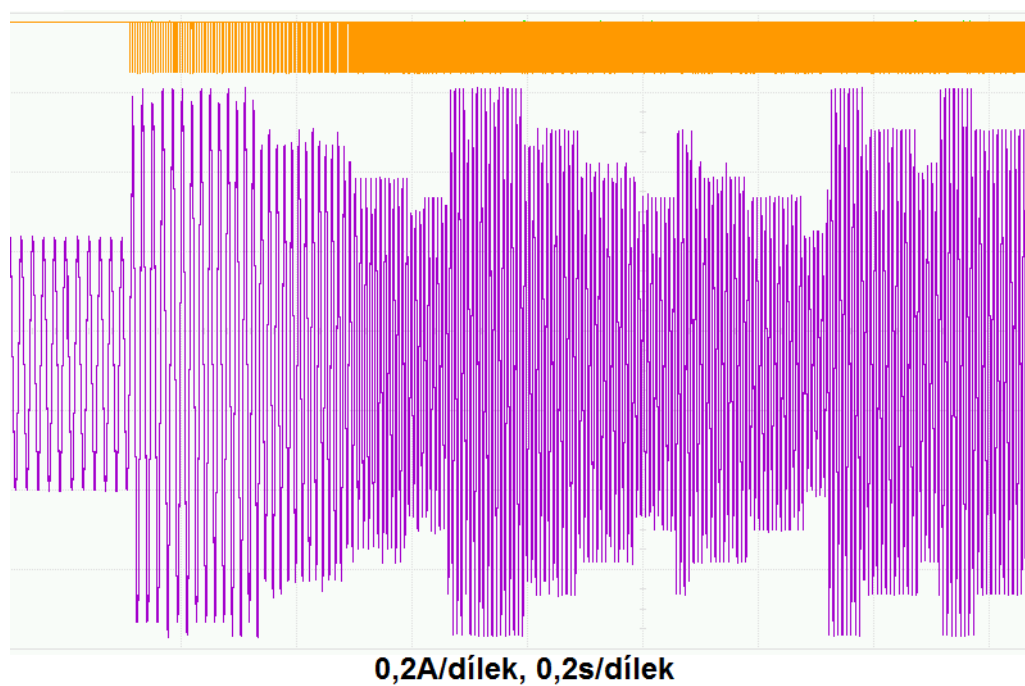
Na základě teorie, která byla ověřená měřením, byl vytvořen algoritmus pro samočinné řízení proudu krokovým motorem v závislosti na zátěži. Při návrhu byly zahrnuty aspekty, jak pro minimální a maximální proud do motoru, tak i správnou polaritu naměřených hodnoty BEMF. Blokové schéma algoritmu je na Obrázek 21 - Blokové schéma algoritmu. Průběh průměrné a aktuální hodnoty BEMF je na Obrázek 22 - Průběh hodnot BEMF při použití algoritmu pro řízení proudu. Velikost proudu tekoucí cívkou X na Obrázek 23 - Průběh proudu při použití algoritmu. Při měření byla hřídel postupně zatížena dvojicí závaží, kdy každé vážilo 50g. V okamžiku, kdy zátěž začala působit na hřídel, došlo ke skokové změně proudu v cívce. Následně došlo k postupnému snižování proudu. Průběhy hodnot BEMF a proudu v případě nezatížené hřídele vidíme na Obrázek 24 - Průběh hodnot BEMF při použití algoritmu na nezatížené hřídeli a Obrázek 25 - Průběh proudu při použití algoritmu na nezatížené hřídeli.



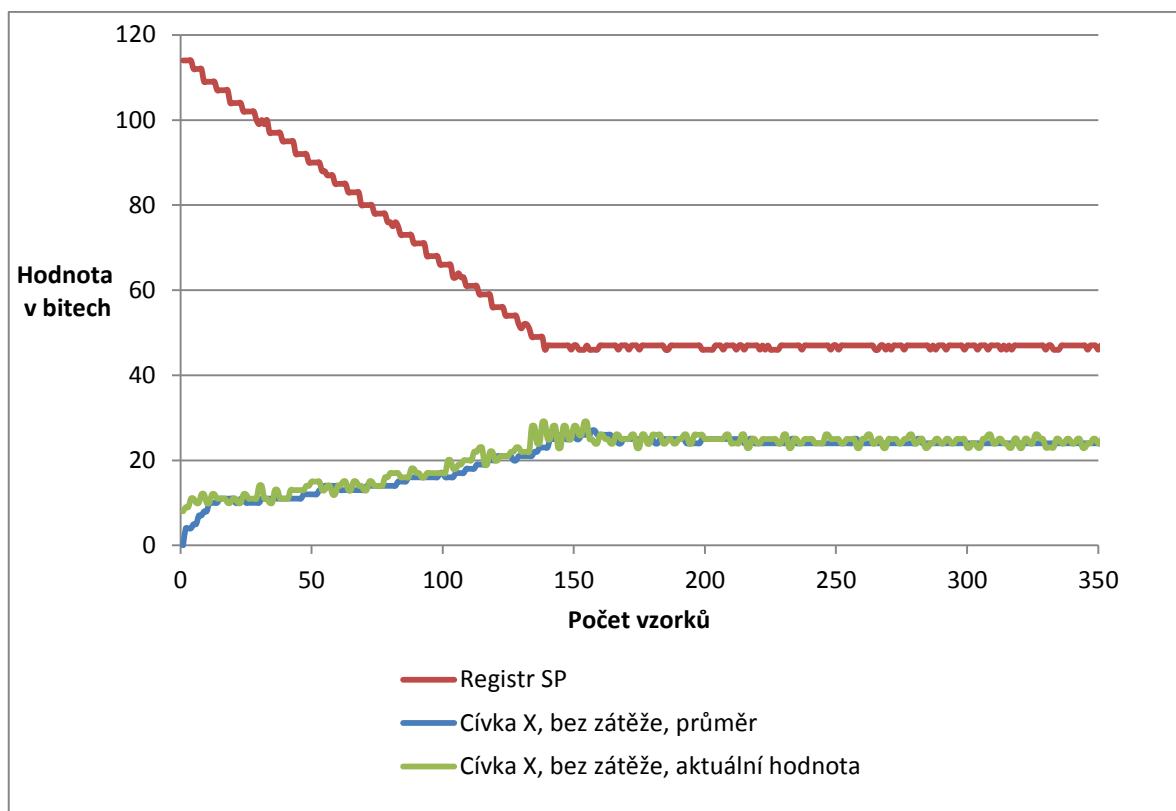
Obrázek 21 - Blokové schéma algoritmu



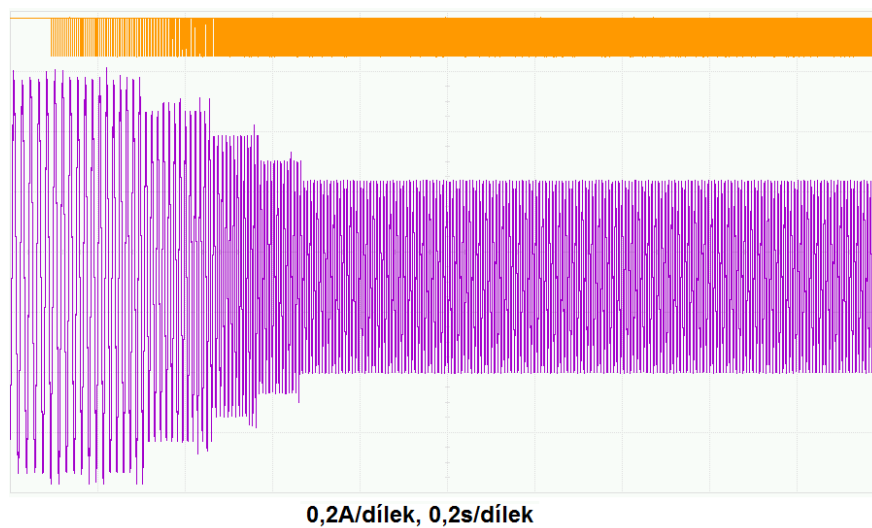
Obrázek 22 - Průběh hodnot BEMF při použití algoritmu pro řízení proudu na zatížené hřídeli



Obrázek 23 - Průběh proudu při použití algoritmu pro řízení proudu na zatížené hřídeli



Obrázek 24 - Průběh hodnot BEMF při použití algoritmu na nezatížené hřídeli



Obrázek 25 - Průběh proudu při použití algoritmu na nezatížené hřídeli

7 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a optimalizovat algoritmy pro řízení krokových motorů se zpětnou vazbou pomocí měření BEMF. Řízení proudu krokovým motorem je samočinně řízeno v závislosti na zátěži. Pro ověření navržených algoritmů bylo realizováno ukázkové zařízení za použití obvodu NCV70514 a mikrokontroléru. Na navrženém a sestaveném zařízení byly změřeny navržené algoritmy.

Pro návrh algoritmů pro řízení krokových motorů jsem se podrobně seznámil s teorií řízení krokových motorů a jejich konstrukcí. Pro řízení krokových motorů byl vybrán řadič NCV70514 od firmy ON Semiconductor. Jedná se o integrovaný obvod obsahující jak řídící, tak výkonovou část v jediném pouzdře. Komunikaci s mikrokontrolérem probíhá pomocí sběrnice SPI a řídících pinů. Jako mikrokontrolér byl vybrán obvod LPC4078FBD144 od firmy NXP. Jedná se o mikrokontrolér typu ARM s jádrem ARM Cortex-M4 v pouzdře LQFP144. Pro snadnější možnosti nastavení a řízení byl vytvořen v počítači ovládací program. Ten komunikuje s mikrokontrolérem prostřednictvím sběrnice USB.

Na ukázkovém zařízení jsem provedl měření, kterými jsem si ověřil teoretické poznatky ze zdrojů. Provedl jsem sérii měření, kde jsem sledoval vliv proudu a zátěže na hodnotě BEMF. Byl kladen důraz na rozdílnou velikost zátěže a rozdílnou hodnotu BEMF z obou cívek krokového motoru. Na základě měření jsem vytvořil algoritmus pro řízení krokových motorů se zpětnou vazbou pomocí měření BEMF. Při návrhu jsem se zaměřil na samočinné řízení proudu krokového motoru při rozdílných hodnotách zátěže. Na základě přiložených měření, byla ověřena funkčnost algoritmu.

Literatura

- [1] SEMICONDUCTOR. *NCV 70514* [online]. Semiconductor Components Industries [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=NCV70514>
- [2] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty : pohony, senzory, řízení*. vyd.1. Praha : BEN-technická literatura, 2005. 248 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [3] AND8471/D: AMIS-30623 / AMIS-30624 / NCV70627 Stall Detection. *AND8471/D* [online]. **2013** [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8471-D.PDF
- [4] Krokové motory: Princip. *Pohonnatechnika* [online]. 2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [5] Krokové motory: Řízení. *Robotika* [online]. 2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [6] *Servo-drive: Speciální krokové motory na míru - často pokládané otázky o krokových motorech* [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.servo-drive.com/specialni-krokovye-motory-krokovye-motory-na-miru.php>
- [7] Allegro: Mikro krokování. *Microstepping Driver with Translator* [online]. 2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Motor-Driver-And-Interface-ICs/Bipolar-Stepper-Motor-Drivers/A3967.aspx>
- [8] KENJŌ, Takashi. *Stepping motors and their microprocessor controls*. New York: Oxford University Press, c1984, viii, 244 p. ISBN 0198593260
- [9] NXP SEMICONDUCTORS. *LPC4078BD144* [online]. NXP Semiconductors, 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC408X_7X.pdf
- [10] FT232R: Datasheet. *FT232R* [online]. **2014** [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf

- [11] ADUM4402: Datasheet. *Asum4402* [online]. 2013 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM4400_4401_4402.pdf

- [12] *KH42HM2-951* [online]. 2014 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.nidec-servo.com/en/digital/pdf/KH42H.pdf>

- [13] *AN3327: L9942 back EMF stall detection algorithm* [online]. 2013, (2): 22 [cit. 2015-05 20]. Dostupné z: = http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00294593.pdf

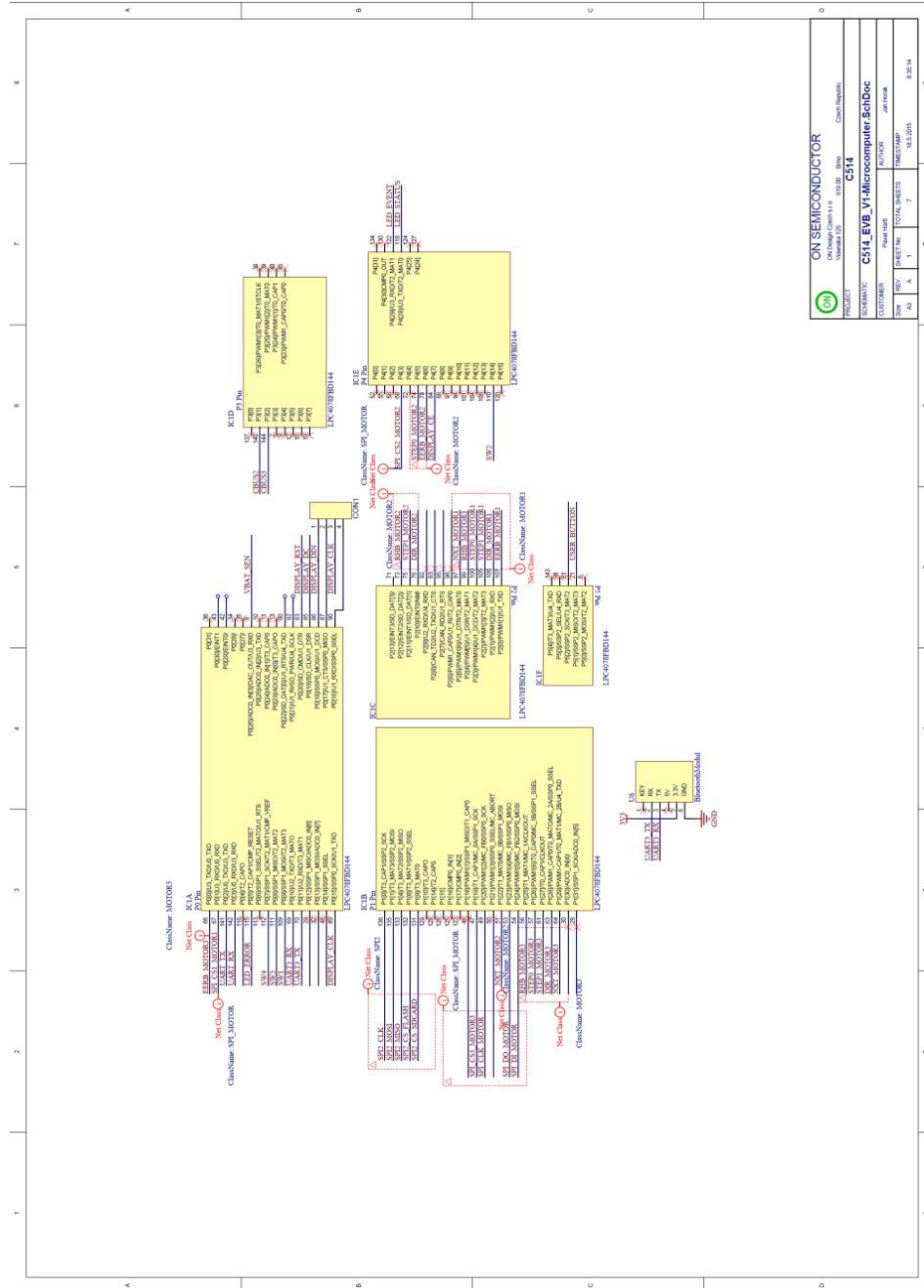
Seznam symbolů, veličin a zkratk

m	Mili
k	Kilo
μ	Mikro
log. 0	Logická 0
log. 1	Logická 1
Nm	Newto metr
Ω	Ohm
ω	Úhlová rychlost
g	gram
A	Plocha jádra cívky
B	Magnetické pole
N	Počet závitů
BEMF	Back electromagnetic force, Zpětnovazební elektromagnetická síla
PLL	Phase-Locked Loop, Fázový závěs
SPI	Seriál Peripheral interface, Sériové periferní rozhraní
USB	Universal Serial Bus, Univerzální sériová sběrnice

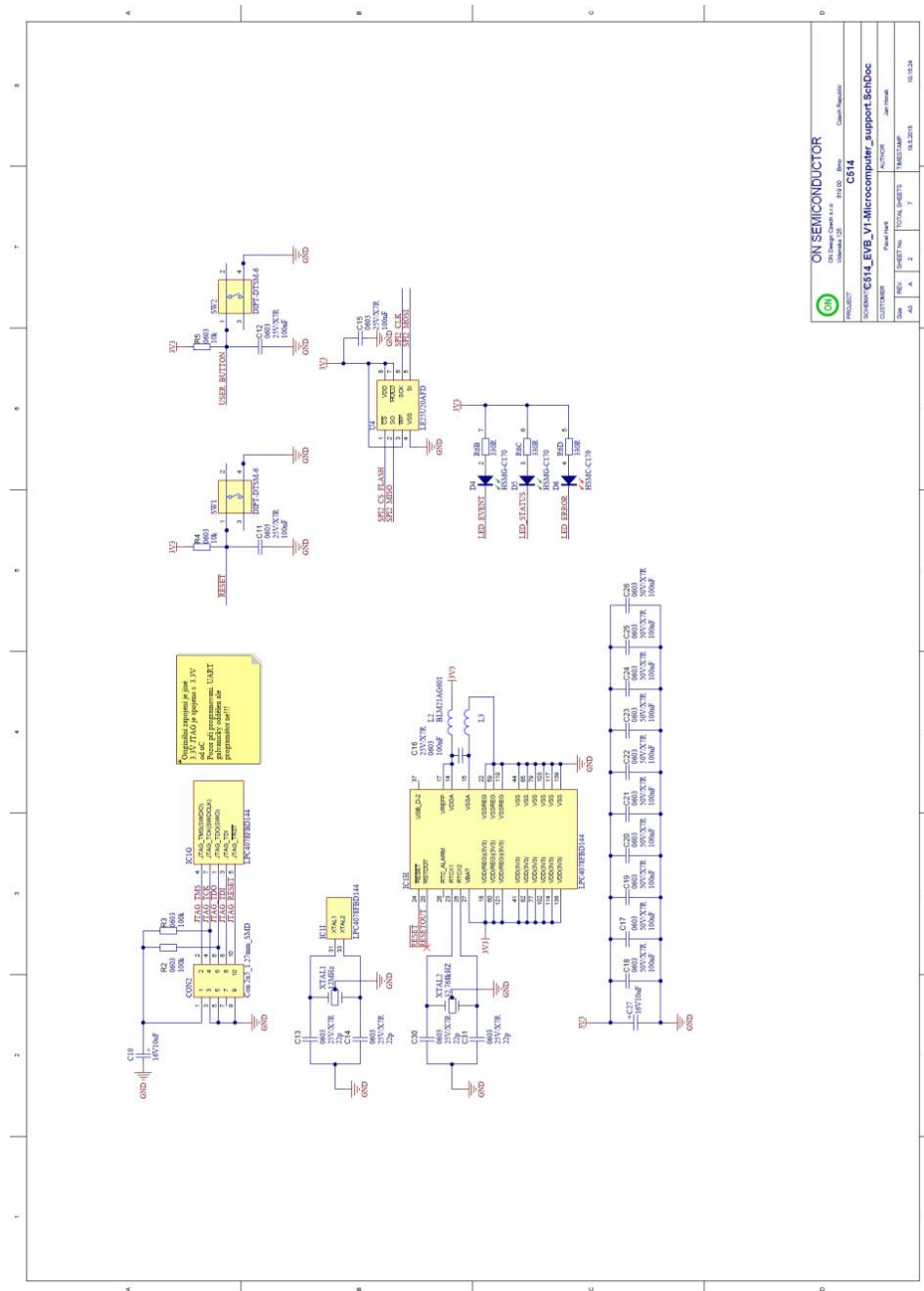
Seznam příloh

Příloha 1 Schéma zapojení C514_EVB – Mikroprocesor	44
Příloha 2 Schéma zapojení C514_EVB - Napájení mikroprocesoru	45
Příloha 3 Schéma zapojení C514_EVB - Napájení zařízení a ovládací prvky	46
Příloha 4 Schéma zapojení C514_EVB - Převodník USB na UART	47
Příloha 5 Schéma zapojení C514_EVB - Zapojení NCV70514 pro motor 1	48
Příloha 6 Schéma zapojení C514_EVB - Zapojení NCV70514 pro motor 2	49
Příloha 7 Schéma zapojení C514_EVB - Zapojení NCV70514 pro motor 3	50
Příloha 8 Návrh plošného spoje C514_EVB - Vrstva TOP	51
Příloha 9 Návrh plošného spoje C514_EVB - Vrstva BOTTOM	52
Příloha 10 Návrh plošného spoje C514_EVB - Rozmístění součástek TOP	53
Příloha 11 Návrh plošného spoje C514_EVB - Rozmístění součástek BOTTOM ..	54
Příloha 12 Seznam Součástek C514_EVB	55
Příloha 13 Schéma zapojení C524	56
Příloha 14 Návrh plošného spoje C524 – Vrstva TOP	57
Příloha 15 Návrh plošného spoje C524 - Vrstva BOTTOM	57
Příloha 16 Návrh plošného spoje C524 - Rozmístění součástek TOP	58
Příloha 17 Návrh plošného spoje C524 - Rozmístění součástek BOTTOM	58
Příloha 18 Seznam součástek C524	59

Příloha 1 Schéma zapojení C514_EVB – Mikroprocesor

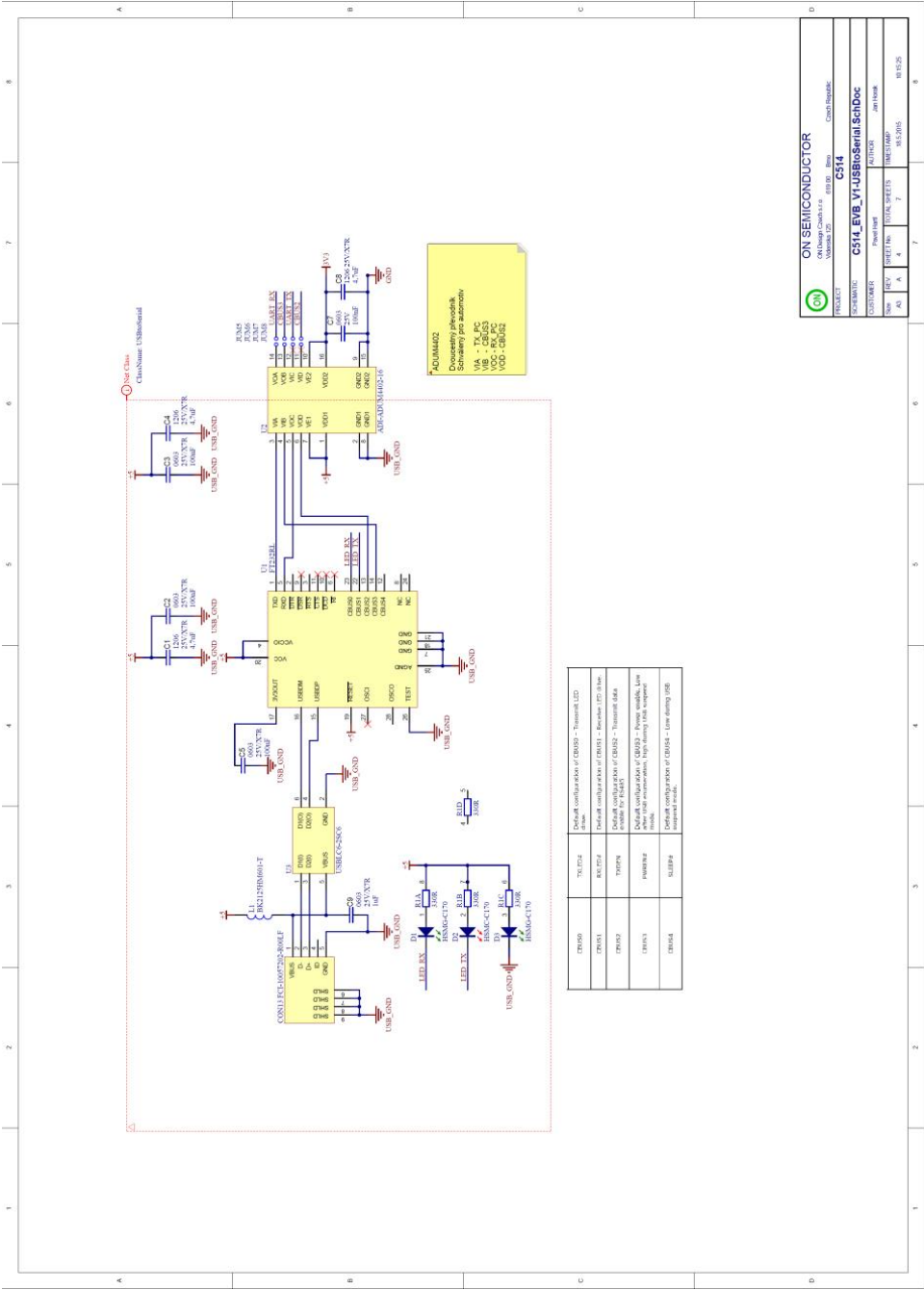


Příloha 2 Schéma zapojení C514_EVB - Napájení mikroprocesoru



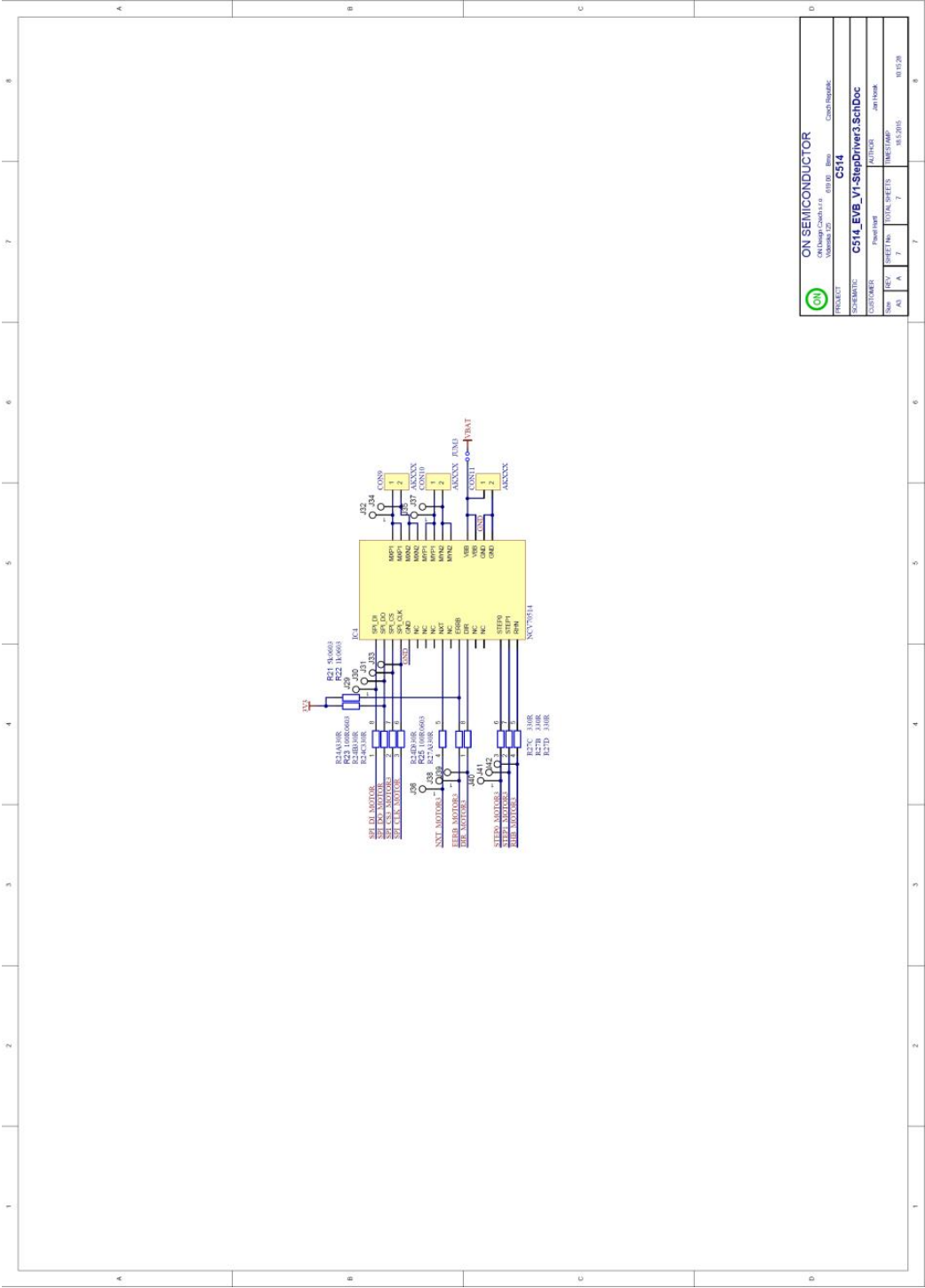
[illegible]

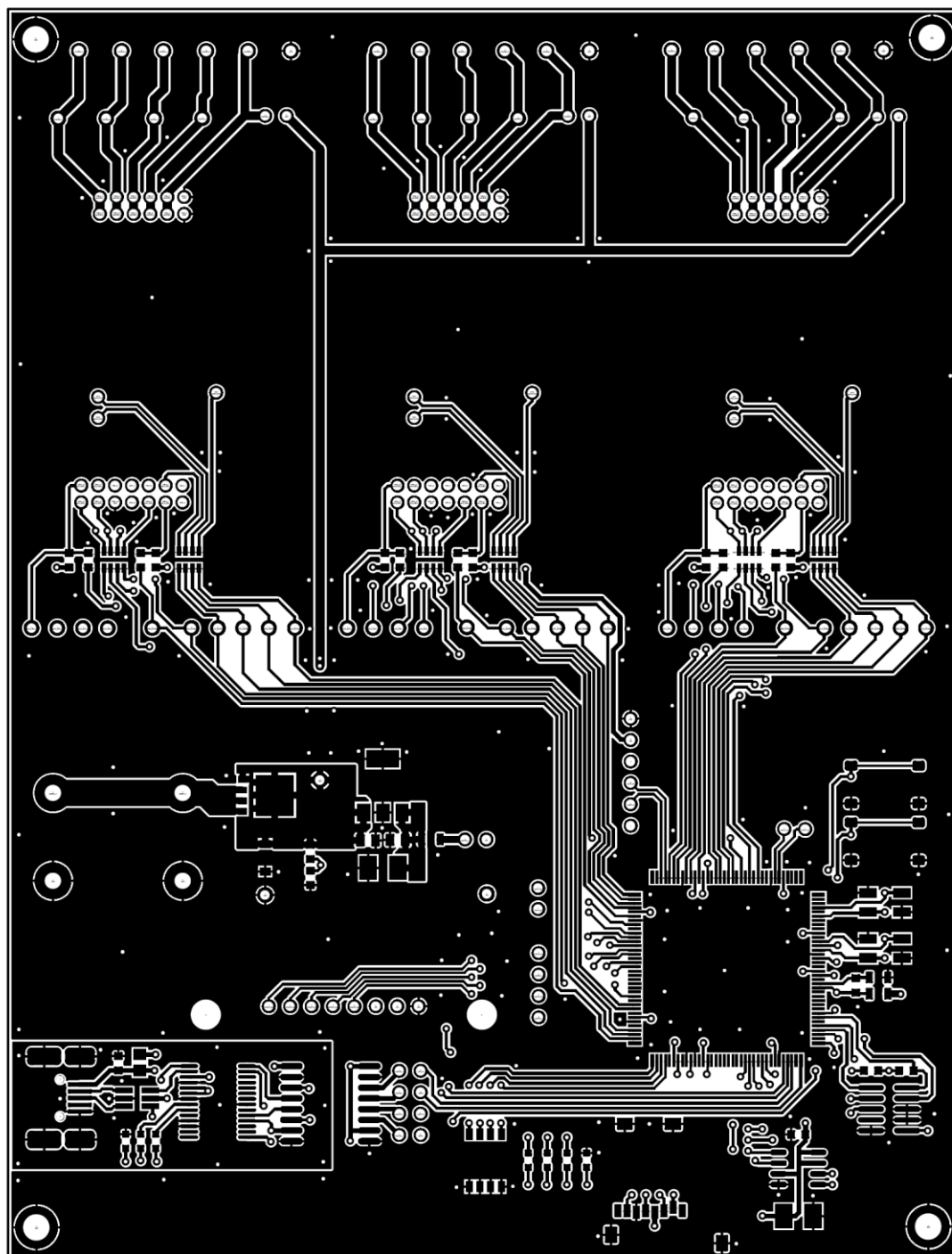
Příloha 4 Schéma zapojení C514_EVB - Převodník USB na UART



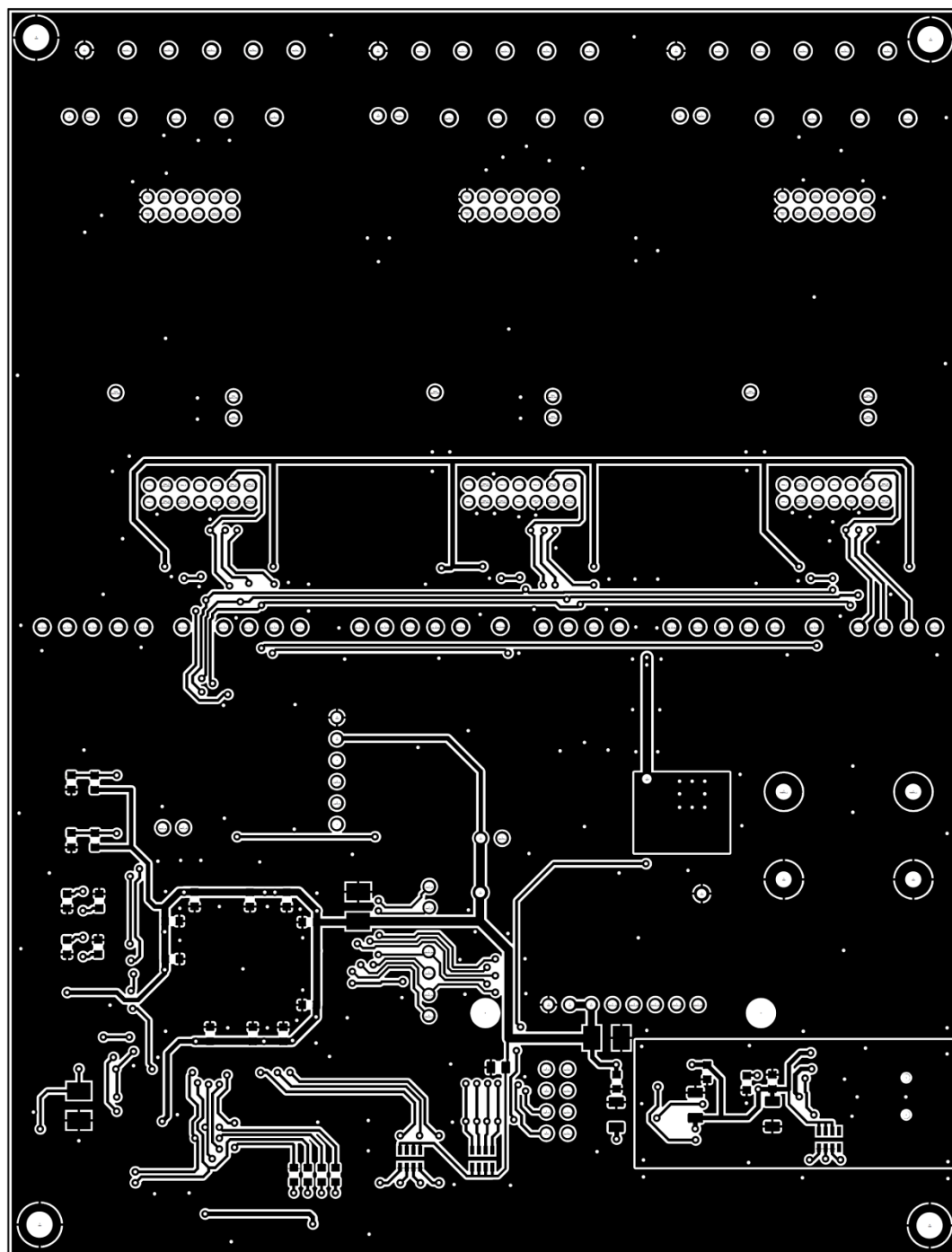
[illegible]

Příloha 7 Schéma zapojení C514_EVB - Zapojení NCV70514 pro motor 3

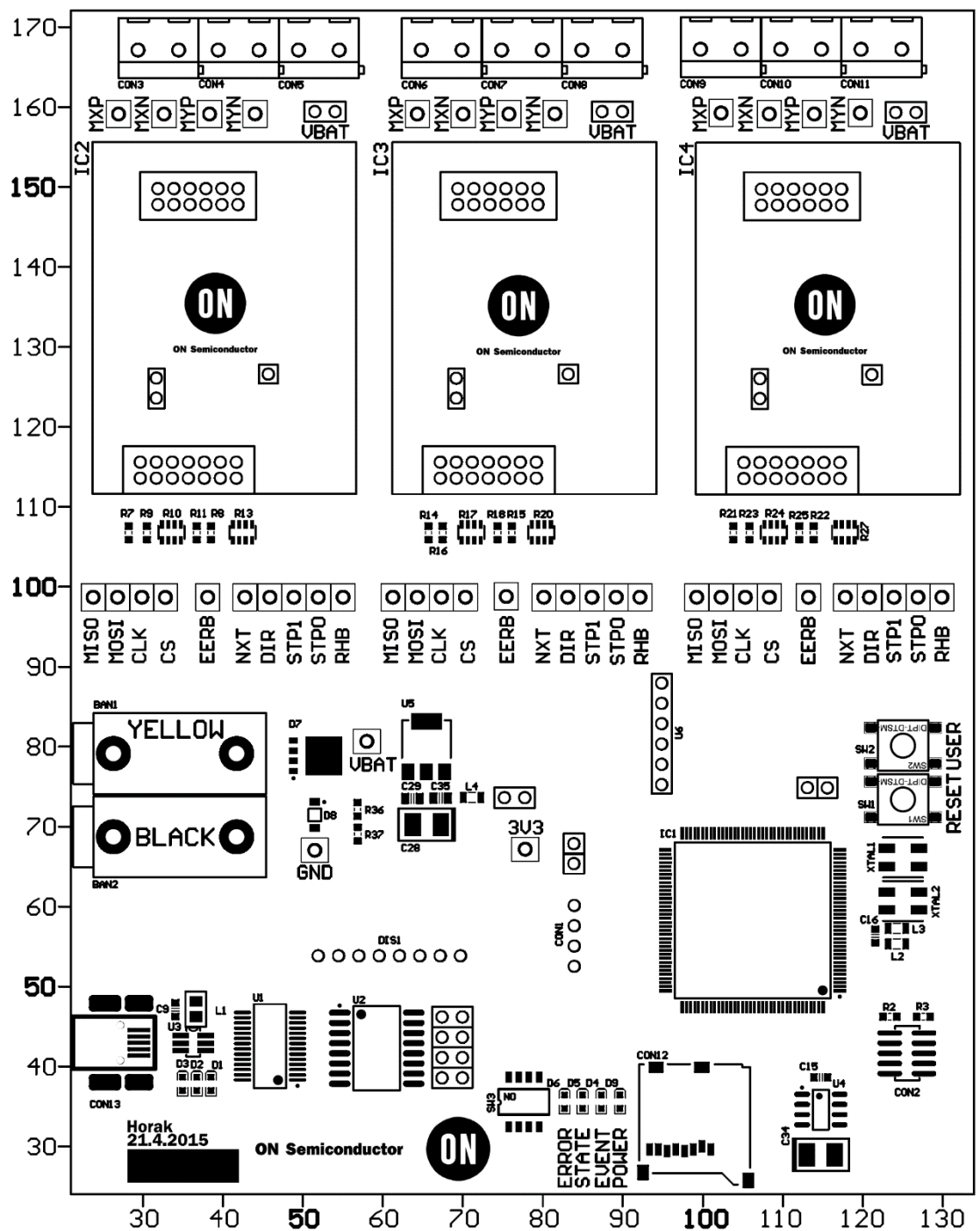




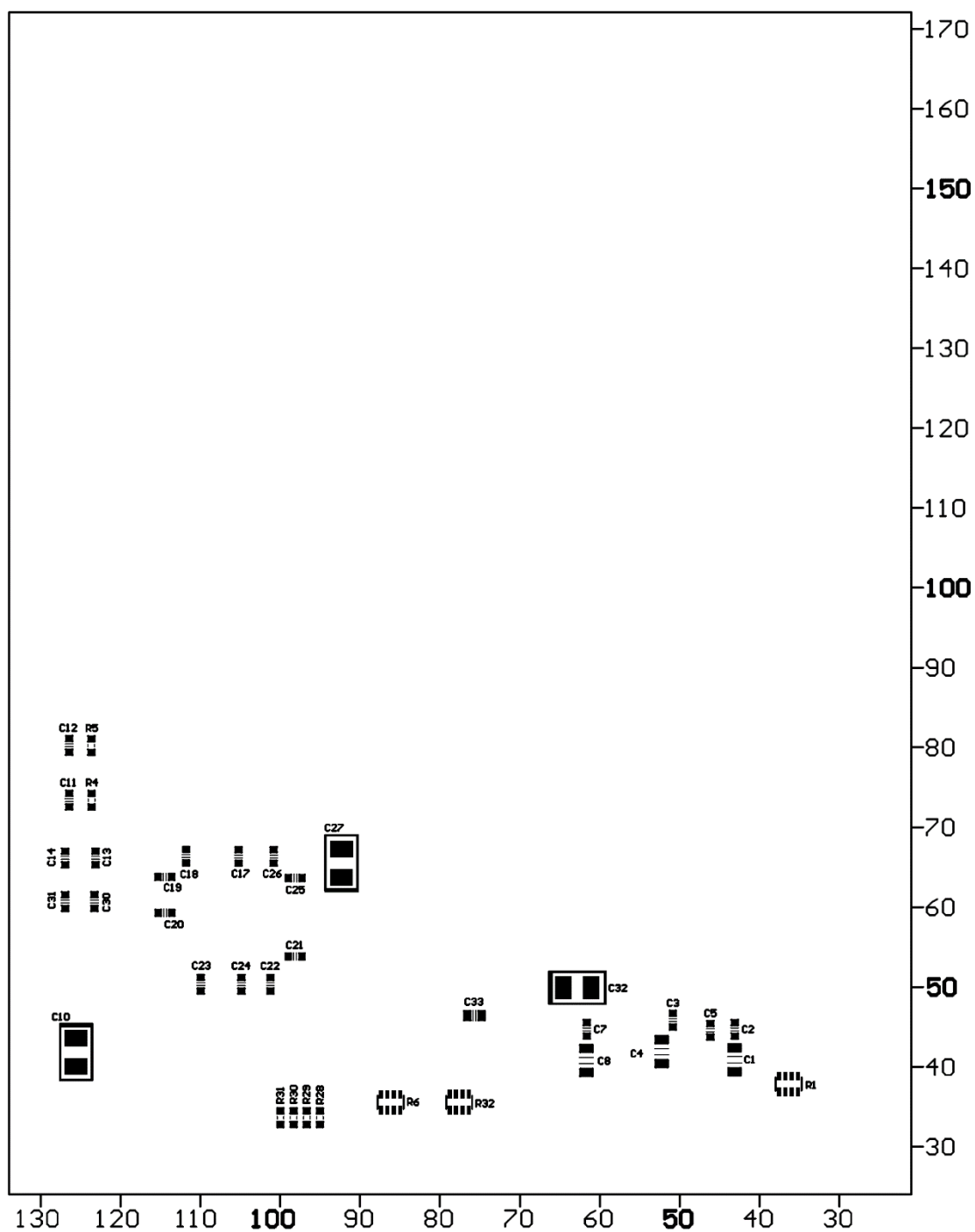
Příloha 9 Návrh plošného spoje C514_EVB - Vrstva BOTOM



Příloha 10 Návrh plošného spoje C514_EVB - Rozmístění součástek TOP



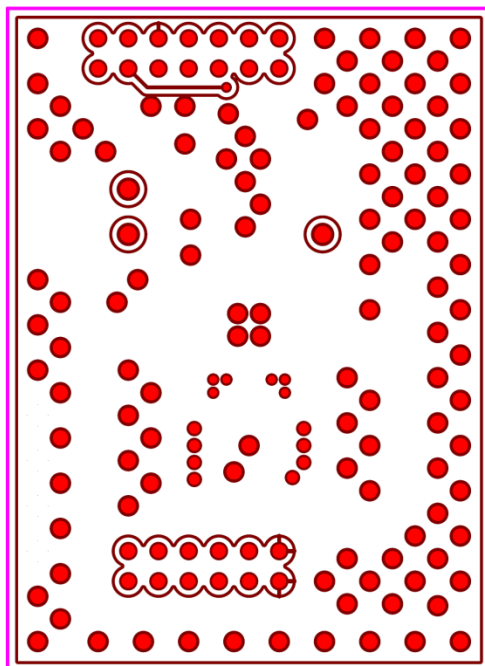
Příloha 11 Návrh plošného spoje C514_EVB - Rozmístění součástek BOTTOM



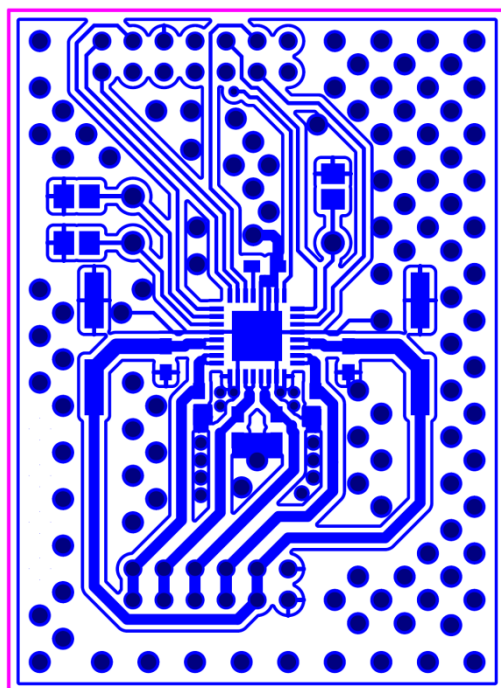
Příloha 12 Seznam Součástek C514_EVB

Součástka	Název	Pouzdro	Počet
Banana_4mm	BAN1	BANANA_YELLOW	1
Banana_4mm	BAN2	BANANA_BLACK	1
4,7uF 10% 1206 X7R Ceramic	C1, C4, C8	CAPC3216N	3
100nF 10% 0603X7R Ceramic	C2, C3, C5, C7, C11, C12, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C21, C22, C23 C24, C25, C26	CAPC1608N	18
100nF 10% 0603X7R Ceramic	C9	CAPC1608N	1
Capacitor 10uF/16V;	C10, C27, C28, C32, C34	SMD_A	5
22pF 10% 0603X7R Ceramic	C13, C14, C30, C31	CAPC1608N	4
100nF 10% 0805 X7R Ceramic	C29, C33, C35	CAPC2012N	3
CONN_SOCKET_1x4P_0.100in	CON1	1X4jumper row	1
Con 2x5_1.27mm_SMD	CON2	CON2X5_1.27MM_SMD	1
AK520	CON3, CON4, CON5, CON6, CON7, CON8, CON9, CON10, CON11	AK500	9
MicroSD Socket	CON12	microSD Socket	1
FCI-10057202-R00LF	CON13	MOLX-67503-1020_V	1
HSMG-C170	D1, D3, D4, D5, D9	LED-0603-GREEN	5
HSMC-C170	D2, D6	LED-0603-RED	2
ONSC-SBD-A1A2A3K5-5	D7	ONSC-DFN-5-488AA_G_V	1
ONSC-K1A2-2	D8	ONSC-SOD-123-2-425-04_V	1
Display Nokia 5110	DIS1	LCD Modul Nokia 5110	1
LPC4084	IC1	LQFP144(OT486-1_V)	1
NCV70514	IC2, IC3, IC4	Modul_NCV70XXX	3
CONN_SOCKET_1x1P_0.100in	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9, J10, J11, J12, J13, J14, J15, J16, J17, J18, J19, J20, J21, J22, J23, J24, J25, J26, J27, J28, J29, J30, J31, J32, J33, J34, J35, J36, J37, J38, J39, J40, J41, J42, J43, J44, J45	1x1POS_HEADER_LOWPROF	45
JUMPER 1x2	JUM1, JUM2, JUM3, JUM4, JUM5, JUM6, JUM7, JUM8	1x2	8
BK2125HM601-T	L1	L0805	1
BLM21AG601	L2, L3, L4	FBC2012N(0805)	3
RESISTOR ARRAY 330R_1206_0.063W_5%	R1, R6, R10, R13, R17, R20, R24, R27	CRA3A4E	8
Resistor 180k SMD 0603 0.1W	R36	RES_0603_(1608)	1
Resistor 20k SMD 0603 0.1W	R37	RES_0603_(1608)	1
Resistor 100k SMD 0603 0.1W	R2, R3	RES_0603_(1608)	2
Resistor 10k SMD 0603 0.1W	R4, R5	RES_0603_(1608)	4
Resistor 1k SMD 0603 0.1W	R7, R8, R14, R15, R21, R22	RES_0603_(1608)	6
Resistor 100R SMD 0603 0.1W	R9, R11, R16, R18, R23, R25, R28, R29, R30, R31	RES_0603_(1608)	10
RESISTOR ARRAY 1k_1206_0.063W_5%	R32	CRA3A4E	1
DIPT-DTSM-6	SW1, SW2	DIPT-DTSM-6_V	2
SWDIP-4-SMD	SW3	DIL8_SMD	1
TestPoint	TestPoint1, TestPoint2, TestPoint3, TestPoint4	TestPoint	4
FT232RL	U1	SSOP-28_N	1

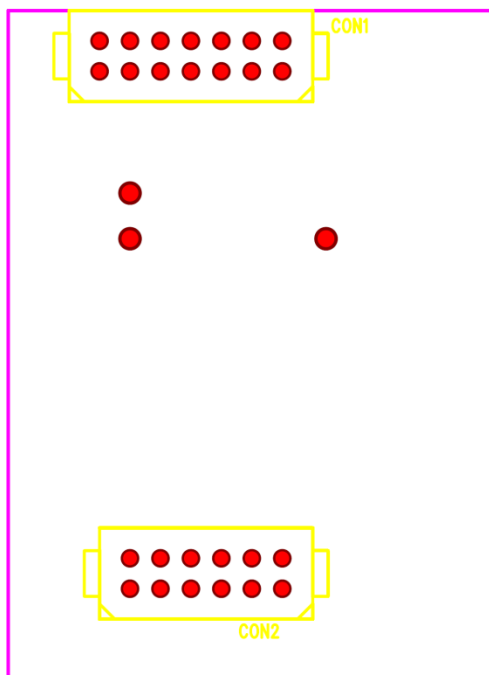
Příloha 14 Návrh plošného spoje C524 – Vrstva TOP



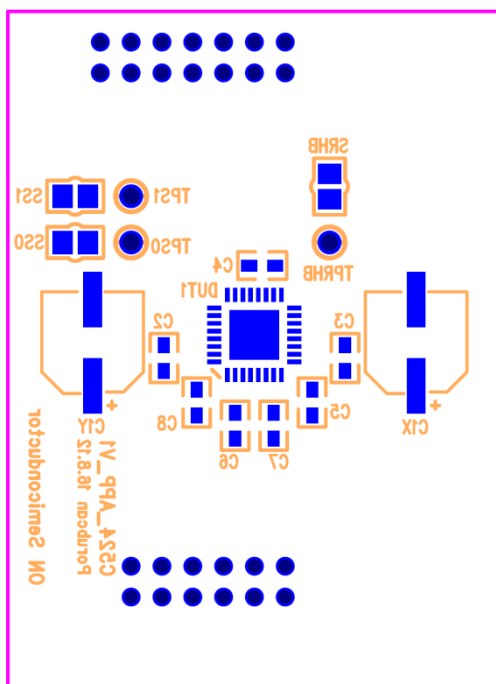
Příloha 15 Návrh plošného spoje C524 - Vrstva BOTTOM



Příloha 16 Návrh plošného spoje C524 - Rozmístění součástek TOP



Příloha 17 Návrh plošného spoje C524 - Rozmístění součástek BOTTOM



Příloha 18 Seznam součástek C524

Designator	Quantity	Description	Value
C1X	1	47UF/50V ELKO NICHICON UD	47µF / 50 V
C1Y	1	47UF/50V ELKO NICHICON UD	47µF / 50 V
C2	1	100NF 0603 50V X7R	0.1µF / 50 V / X7R
C3	1	100NF 0603 50V X7R	0.1µF / 50 V / X7R
C4	1	100NF 0603 50V X7R	0.1µF / 50 V / X7R
C5	1	1 0NF 0603 50V X7R	1000pF / 50 V / X7R
C6	1	1 0NF 0603 50V X7R	1000pF / 50 V / X7R
C7	1	1 0NF 0603 50V X7R	1000pF / 50 V / X7R
C8	1	1 0NF 0603 50V X7R	1000pF / 50 V / X7R
CON1	1	CONN HDR 2MM VERT DUAL 14POS SHROUDED	-
CON2	1	CONN HDR 2MM VERT DUAL 12POS SHROUDED	-
DUT1	1	ONSEMI_NCV70524_QFN32	-
SRHB	0	JUMPER2 STRAP	DNP
SS0	0	JUMPER2 STRAP	DNP
SS1	0	JUMPER2 STRAP	DNP
TPRHB	0	TP S200 H1 0 BLACK	DNP
TPS0	0	TP S200 H1 0 BLACK	DNP
TPS1	0	TP S200 H1 0 BLACK	DNP